PHILIPS



CURSUS BEDRIJFSELEKTRONICA

Elektronische componenten

Leerlingboek BS 5

Philips Nederland B.V. - Afd. Onderwijsactiviteiten

Tweede, herziene druk 1976

Zevende druk 1981

161220·5

PHILIPS



CURSUS BEDRIJFSELEKTRONICA

Elektronische componenten

Leerlingboek BS 5

Philips Nederland B.V. - Afd. Onderwijsactiviteiten

Tweede, herziene druk 1976

Zevende druk 1981

161220-5

INHOUDSOPGAVE

b

B 207

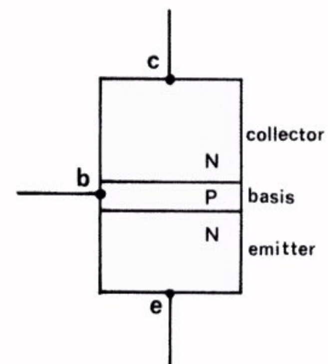
DE LAGENTRANSISTOR

SAMENSTELLING EN SYMBOOL

Een *transistor* is een halfgeleidercomponent waarmee men kan versterken. Er bestaan verschillende soorten transistors, waarvan de zogenaamde *lagentransistor* de meest toegepaste is. Deze lagentransistor gaan we in de volgende lessen bespreken.

Een lagentransistor is bijna altijd vervaardigd uit silicium. Hij bestaat uit drie delen:

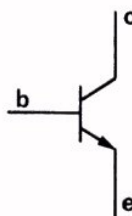
de *emitter* e,
de *basis* b,
en de *collector* c.



Deze drie delen bestaan bijvoorbeeld achtereenvolgens uit N-, P- en N-materiaal. Men noemt zo'n transistor dan ook een NPN-transistor. Later zullen we nog kennis maken met PNP-transistors.

De basis is altijd een zeer dun laagje (ongeveer één duizendste mm dik), dat tussen emitter en collector in ligt.
Verder heeft de collector meestal grotere afmetingen dan de emitter.

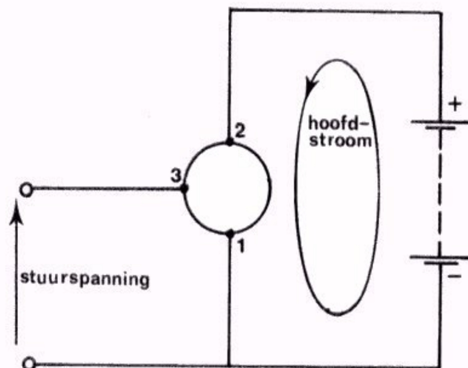
Hieronder is het symbool voor een NPN-transistor gegeven, zoals dat in schema's wordt gebruikt.



HOOFDSTROOM EN STUURSPANNING

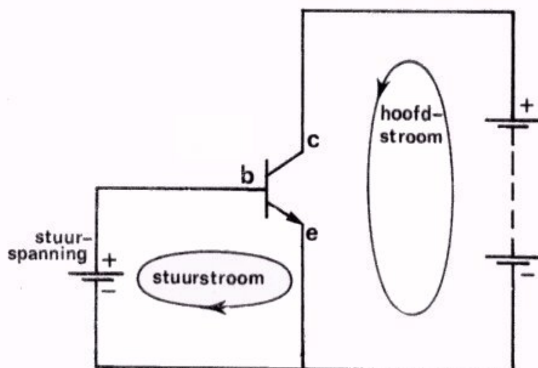
Een transistor is een *actieve component*, d.w.z. dat hij elektrisch vermogen kan versterken. *Passieve componenten*, zoals weerstanden, condensators, spoelen en transformators kunnen dit niet.

Actieve componenten hebben minstens drie aansluitingen.



Tussen twee daarvan loopt de *hoofdstroom.*
Tussen twee andere wordt de zogenaamde *stuurspanning* aangesloten, met behulp waarvan de grootte van de hoofdstroom te variëren is. In dit voorbeeld loopt de hoofdstroom tussen 2 en 1. De stuurspanning bevindt zich tussen 3 en 1.
Vaak loopt er tussen 3 en 1 nog een kleine stuurstroom.

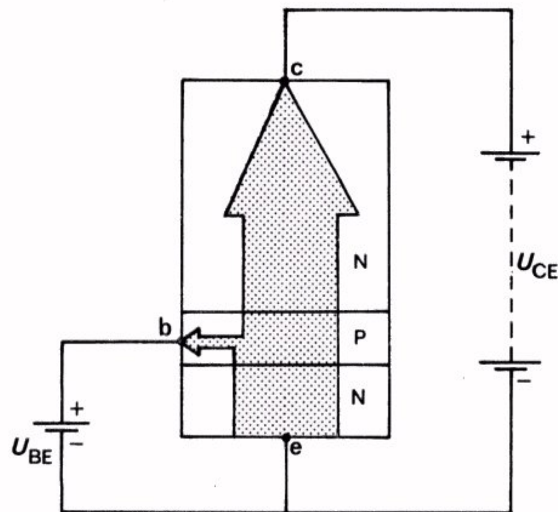
Het bovenstaande geldt algemeen voor een actieve component. Kijken we nu eens speciaal naar de lagentransistor.



De hoofdstroom loopt tussen collector en emitter. De pijl van het transistorsymbool geeft daarbij de richting aan van de elektrische stroom. Tussen basis en emitter wordt de stuurspanning aangebracht. Hierbij gaat er tevens een kleine stuurstroom lopen.

DE WERKING VAN DE TRANSISTOR.

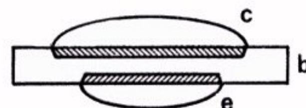
We gaan niet grondig in op de ingewikkelde processen die zich binnen een transistor afspelen. U krijgt daar als elektronicus ook niets mee te maken. Om praktisch goed te kunnen werken, wordt een transistor van twee gelijkspanningen voorzien. Hier is zeer schematisch getekend wat er in een NPN-transistor gebeurt bij aansluiting van de getekende spanningen tussen collector en emitter en tussen basis en emitter.



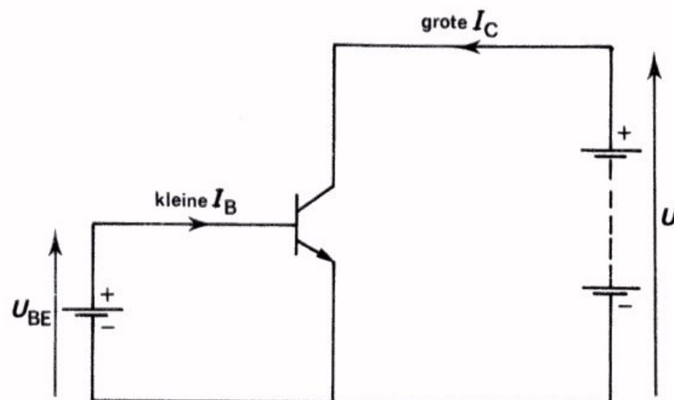
Het onderste deel van de transistor is als een diode te beschouwen waarop een doorlaatspanning U_{BE} is aangesloten. Vanuit de emitter loopt een kleine elektronenstroom naar de basis. Verreweg het grootste deel van de emitterstroom gaat door naar de collector. Slechts een klein deel van de elektronen zorgt voor een stroompje via de basisaansluiting.
Merk op, dat de getekende pijlen elektronenstromen voorstellen; de elektrische stromen lopen juist andersom.

De namen "emitter" en "collector" zijn nu ook wat begrijpelijker. "Emitteren" betekent "uitzenden"; vanuit de emitter worden de elektronen uitgezonden. "Collecteren" betekent "verzamelen"; het grootste deel van de elektronen verzamelt zich bij de collector.

De basis dankt zijn naam aan de oorspronkelijke transistorconstructie, die er zo uitzag:



De basis was hierbij de drager van collector en emitter.



Hier is de transistorschakeling nogmaals getekend, nu met een transistorsymbool en de elektrische stromen I_B en I_C.

I_B betekent *basisstroom* en I_C *collectorstroom.*

Bekijken we deze schakeling, dan zien we het volgende:
Het aansluiten van U_{BE} gaat samen met het toevoeren van een *kleine* stroom I_B en heeft een *grote* stroom I_C tot gevolg.
Hierin zit nu het principe van de werking van de transistor.

Met een klein stroompje I_B "sturen" we een grote stroom I_C.

Een kleine gelijkstroom I_B heeft een grotere gelijkstroom I_C tot gevolg.

We zeggen dat de versterking van gelijkstroom plaatsvindt.

De grootte van deze versterking noemt men de *gelijkstroomversterkingsfactor*:

$$h_{FE} = \frac{I_C}{I_B}$$

VOORBEELD

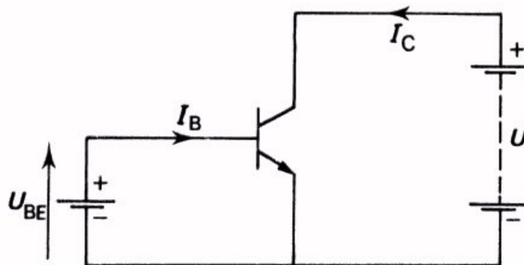
Veroorzaakt een basisstroom van 0,5 mA een collectorstroom van 30 mA, dan is de gelijkstroomversterkingsfactor:

$$h_{FE} = \frac{30}{0,5} = 60.$$

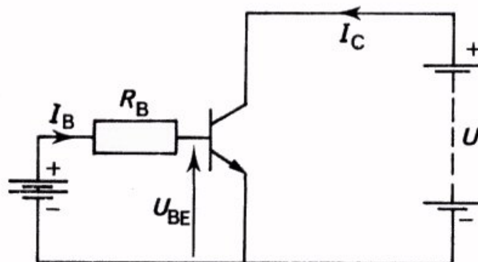
Op de betekenis van F en E komen we later nog terug. Wel vermelden we reeds: dat F en E met hoofdletters zijn geschreven wil zeggen, dat we met *gelijkstroom*grootheden hebben te doen.

DE PRAKTISCHE VOORZIENING VAN DE GELIJKSPANNING

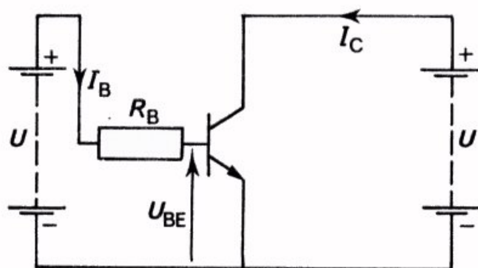
Op het vorig blad hebben we een zeer eenvoudige schakeling van een NPN-transistor gebruikt om iets van de werking van de schakeling te zeggen. Vanuit deze simpele schakeling kunnen we als volgt tot een praktisch beter bruikbare schakeling komen.



Hier is de schakeling nogmaals getekend.

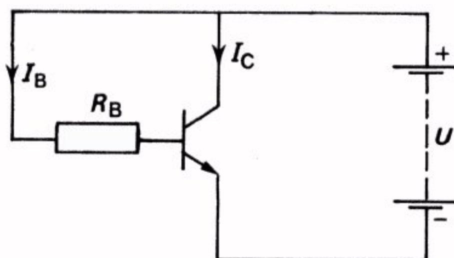


We hebben gezien, dat we maar een kleine I_B nodig hebben om een grote I_C te verkrijgen. Een iets te grote spanning U_{BE} kan direct zó'n grote stroom vanuit de emitter veroorzaken, dat de transistor te heet wordt en kapot gaat. Om dit gevaar te verminderen brengt men een serieweerstand aan, de zogenaamde *basisweerstand*.



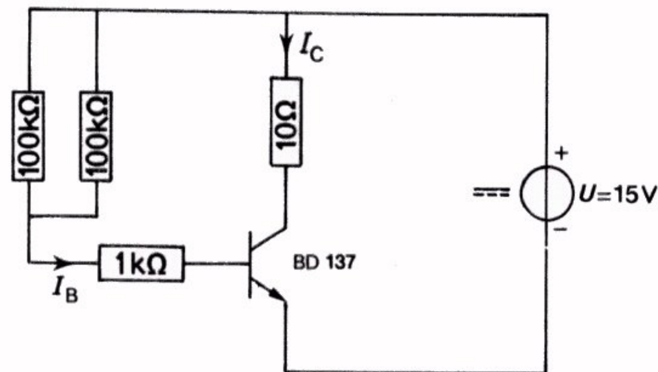
Een ernstig nadeel van deze schakeling is dat er twee spanningsbronnen nodig zijn. Dit nadeel kunnen we als volgt vermijden:

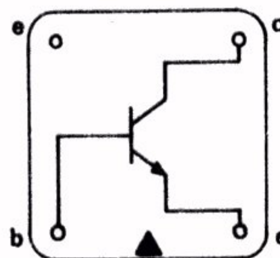
In gedachten maken we de linker batterij even groot als de rechter.
Om de stroom I_B klein te houden moeten we dan de weerstand R_B vergroten.



Twee dezelfde batterijen in één schakeling is nogal overbodig.
We kunnen de gelijkspanningen voor collector en basis wel van één batterij halen. Als we dit doen ontstaat nevenstaande schakeling. Ga dit zorgvuldig na.

OPDRACHT: METEN VAN h_{FE}.





merkteken

- Bouw deze schakeling.

  R_B wordt gevormd door de beide weerstanden van 100 kΩ plus een weerstand van 1 kΩ.

  In de collectorleiding is een extra weerstand van 10 Ω opgenomen.

  Sluit de transistor goed aan, anders kan hij defect **geraken**.

- Voer een spanning toe van 15 V. Verbind de aardklem van de voeding met de "- klem".

- Meet met een universeelmeter de spanningen over de weerstand van 1 kΩ en over de weerstand van 10 Ω.

  Bereken nu de stromen: I_B =

  en I_C =

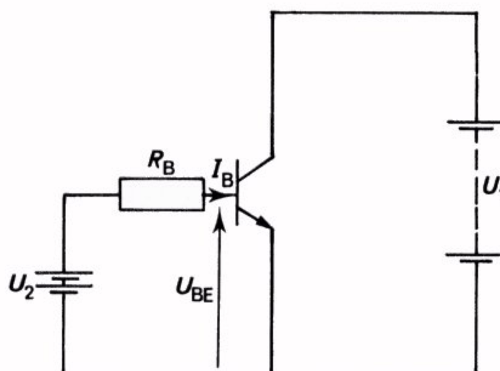
- Hieruit volgt de gelijkstroomversterkingsfactor:

$$h_{FE} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{\quad}{\quad} = $$

- Breek de schakeling nog niet af, maar schakel de gelijkspanningsbron uit.

VOORBEELDEN VAN BEREKENINGEN

We gaan nu de voorafgaande theorie in een tweetal berekeningsvoorbeelden in de praktijk brengen.
Eerst een opmerking.
De "onderkant" van een transistor bestaat uit een diode in doorlaatrichting. De doorlaatspanning van een siliciumdiode bedraagt ongeveer 0,7 V. Tussen basis en emitter staat bij een transistor dus een gelijkspanning U_{BE} = 0,7 V. Bekijken we nu volgende schakeling die nog met twee gelijkspanningsbronnen is uitgevoerd.



Gegeven is dat: U_1 = 20 V en U_2 = 6,7 V.
Gevraagd wordt hoe groot men de basisweerstand R_B moet nemen om te bereiken dat de basisstroom I_B = 100 µA.

Oplossing:

"Links van R_B" staat U_2 = 6,7 V.

"Rechts van R_B" staat de doorlaatspanning U_{BE} = 0,7 V.

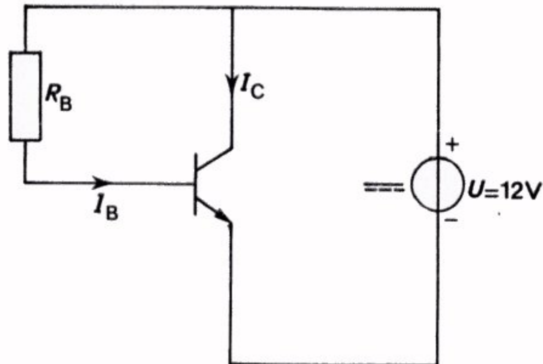
Over R_B staat dus: 6,7 - 0,7 = 6,0 V.

Door R_B moet lopen I_B = 100 µA.

Dus:

$$R_B = \frac{6,0}{I_B} = \frac{6,0}{100.10^{-6}} = \underline{60\ k\Omega.}$$

Nu een tweede voorbeeld.



In deze schakeling is maar één spanningsbron gebruikt. Gegeven is dat bij deze transistor de gelijkstroomversterkingsfactor h_{FE} = 200.
We willen dat de collectorstroom I_C = 40 mA.
Hoe groot moet I_B nu zijn?
Hoe groot dient men R_B dan te nemen?

Oplossing:

$$h_{FE} = \frac{I_C}{I_B} \quad \rightarrow I_B = \frac{I_C}{h_{FE}}$$

$$I_B = \frac{40}{200} = 0{,}2 \text{ mA} = \underline{200\ \mu\text{A}}.$$

Over R_B staat: $U - U_{BE} = 12 - 0{,}7 = 11{,}3$ V.
Door R_B loopt I_B = 200 µA.
Dus:

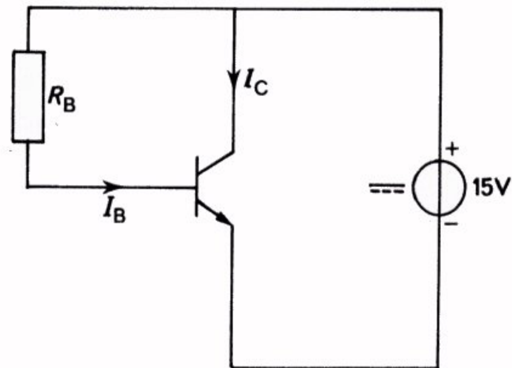
$$R_B = \frac{11{,}3}{I_B} = \frac{11{,}3}{200.10^{-6}} = 56{,}5.10^3\ \Omega$$

$$= \underline{56{,}5\ \text{k}\Omega}.$$

OEFENINGEN

Na de voorafgaande voorbeelden moet u eens proberen volgende vraagstukken zelf te maken.

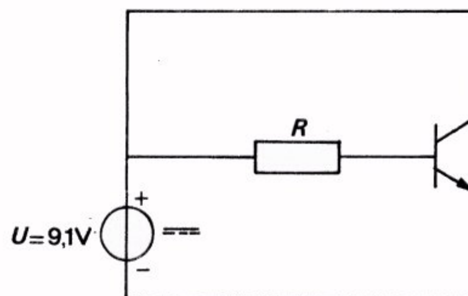
1.

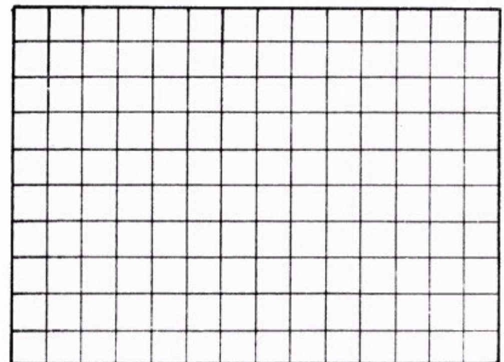


In deze schakeling geldt I_B = 80 µA en I_C = 4 mA.
Hoe groot is de gelijkstroomversterkingsfactor?

h_{FE} =

2.





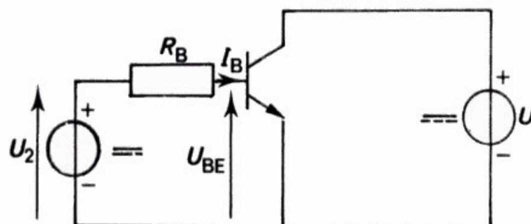
De transistor in deze schakeling heeft een h_{FE} = 150.
Men wenst een collectorstroom van 1,8 mA.
Teken naast het gegeven schema de schakeling op meer gebruikelijke wijze.
Hoe groot moet de weerstand R in de schakeling zijn?

R =

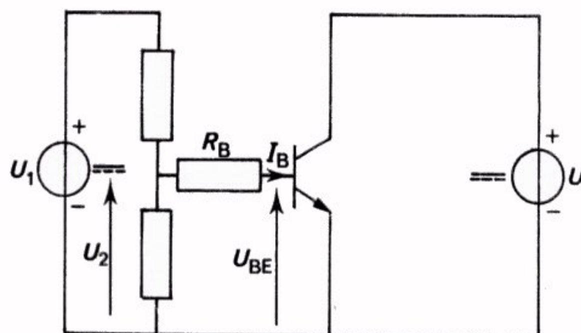
ANDERE MANIER OM TOT EEN PRAKTISCHE VOORZIENING VAN DE GELIJKSPANNING TE KOMEN.

Op blad B207.5 hebben we gezien hoe we tot een schakeling konden komen, waarbij maar één voedingsbron werd gebruikt. Er is nog een andere manier om dit te doen. Hieronder zetten we dit stap voor stap uiteen.

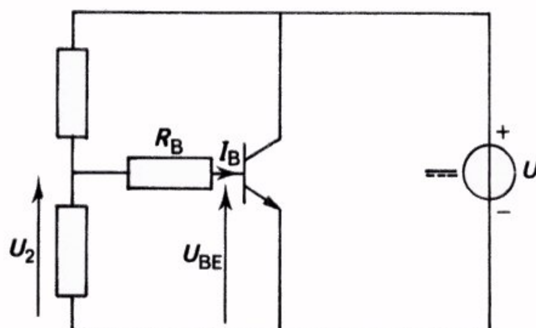
Hier eerst het beginschema voor gelijkstroom.



We vervangen U_2 nu door een spanningsbron met dezelfde spanning U_1 als die van de rechter spanningsbron. Bovendien brengen we een spanningsdeler aan om toch U_2 te verkrijgen.



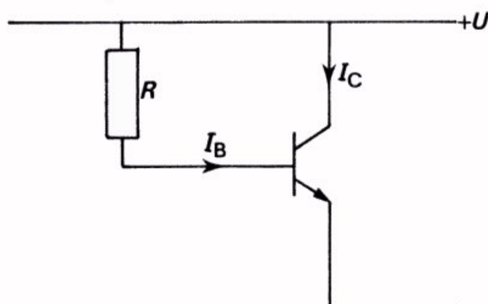
Tenslotte vervangen we de twee nu gelijke voedingsbronnen door één voedingsbron.



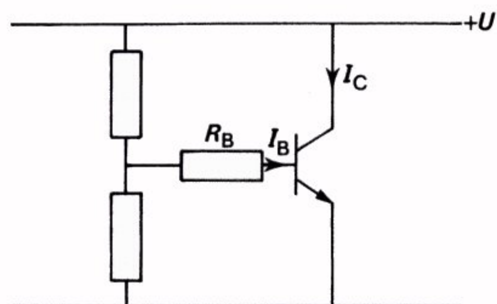
Deze spanningsdeler om een spanning U_2 te verkrijgen die lager is dan de voedingsspanning U_1 komt men in praktische schakelingen vaak tegen.

ANDERE MANIER VAN TEKENEN.

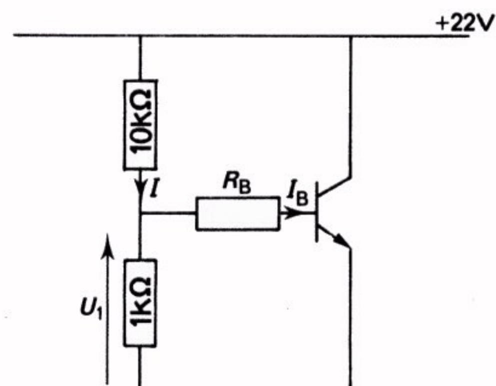
Vaak tekent men de gelijkspanningsbron bij transistorschakelingen helemaal niet. Men geeft het schema op de volgende wijze weer "tussen twee horizontale strepen":



Een ander voorbeeld.



OEFENING



I_B is véél kleiner dan I.

Hoe groot is I ongeveer?

$I \approx$

Hoe groot is U_1 ongeveer?

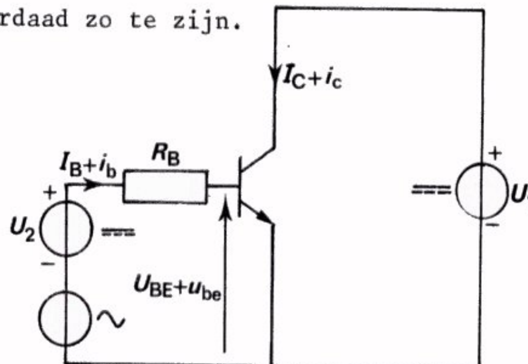
$U_1 \approx$

Hoe groot dient R_B te zijn, opdat $I_B = 50\ \mu A$?

$R_B \approx$

DE WISSELSTROOMVERSTERKING.

We hebben in het voorafgaande gezien dat bij een transistor een kleine basisgelijkstroom een veel grotere collectorgelijkstroom veroorzaakt. Er treedt dus gelijkstroomversterking op. De vraag doet zich voor of het ook mogelijk is wisselstroom te versterken.
Dit blijkt inderdaad zo te zijn.



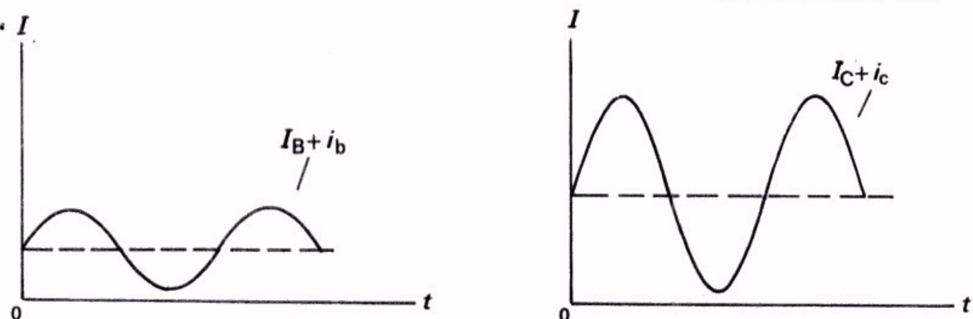
Hier is weer een transistorschakeling getekend. Gemakshalve is tussen basis en emitter weer een tweede gelijkspanningsbron geplaatst. Tevens bevindt zich in serie met deze gelijkspanningsbron een wisselspanningsbron.
De stuurspanning varieert tussen de waarden:

$$U_{BE} + u_{be} \quad \text{en} \quad U_{BE} - u_{be}.$$

Er gaat dan ook een pulserende basisstroom lopen die varieert tussen de waarden:

$$I_B + i_b \quad \text{en} \quad I_B - i_b.$$

Deze veranderende stuurstroom heeft een veranderende collectorstroom ten gevolge.



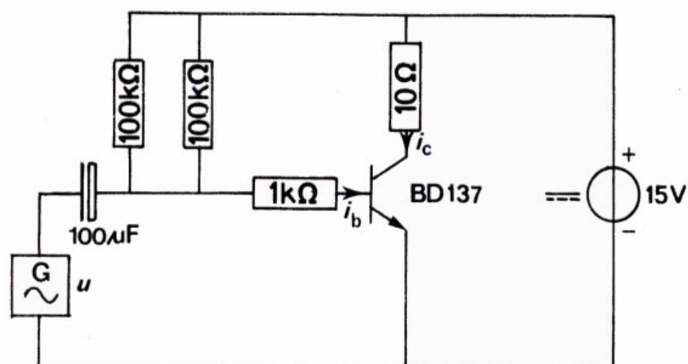
De wisselstroomcomponent van de collectorstroom is veel groter dan die van de basisstroom. Er vindt dus versterking van wisselstroom plaats.
De grootte van de wisselstroomversterking geeft men aan als:

$$\boxed{h_{fe} = \frac{i_c}{i_b}}$$

h_{fe} is de zogenaamde *wisselstroomversterkingsfactor*

Deze kan tussen ongeveer 20 en 1000 liggen. Merk op: bij de *gelijkstroomversterkingsfactor* h_{FE} wordt FE met hoofdletters en bij de *wisselstroomversterkingsfactor* h_{fe} wordt fe met kleine letters geschreven.

OPDRACHT: HET METEN VAN h_{fe}.



- Voeg aan de schakeling op uw paneel de condensator en de generator toe.
- Stel de generator in op 0,5 kHz en laat u toenemen totdat $I_{b(eff)}$ = 100 µA. We stellen deze wisselstroom in door de spanning te meten over de weerstand van 1 kΩ met behulp van een elektronische universeelmeter.
- Meet vervolgens met dezelfde meter de spanning over de weerstand van 10 Ω. De collectorstroom bedraagt nu:

$I_{c(eff)}$ = [mA]

Nu kunnen we de wisselstroomversterkingsfactor berekenen:

$$h_{fe} = \frac{i_c}{i_b} = \rule{5cm}{0.4pt} = \boxed{}$$

U ziet dat er inderdaad een flinke wisselstroomversterking optreedt.

VRAAG

Vertel in het kort waarom de condensator in de schakeling is opgenomen?

____

____

____

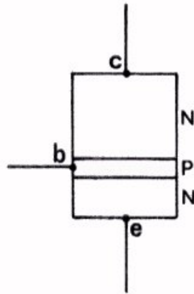
____

____

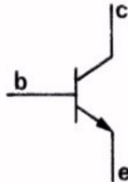
____

____

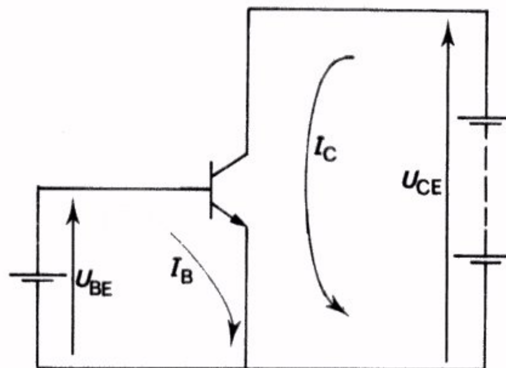
SAMENVATTING

- 

Een NPN-*lagentransistor* is samengesteld uit drie delen: een emitter en een collector van N-halfgeleidermateriaal en daartussen een zeer dunne basis van P-materiaal.

- 

Hiernaast het symbool van een NPN-transistor. De pijl geeft de elektrische stroomrichting aan (van + naar -).

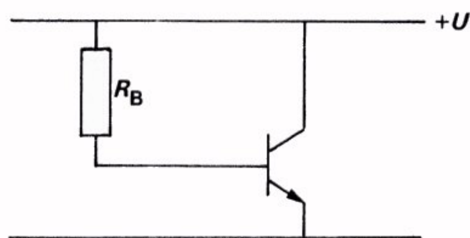
- 

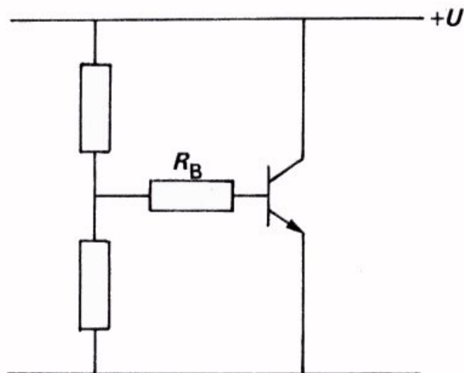
Om de transistor te laten werken moet tussen collector en emitter een gelijkspanning U_{CE} worden aangesloten. Bovendien moet tussen basis en emitter een veel kleinere gelijkspanning U_{BE} staan.
Dank zij U_{BE} gaat er een kleine basisstroom I_B lopen, die een veel grotere collectorstroom I_C tot gevolg heeft.
U_{BE} en I_B zijn de kleine *stuur*spanning en de kleine *stuur*stroom die de grote *hoofd*stroom I_C tot gevolg hebben.

De verhouding $\frac{I_C}{I_B}$ noemt men de *gelijkstroomversterkingsfactor*, aangeduid met h_{FE}:

$$\boxed{h_{FE} = \frac{I_C}{I_B}}$$

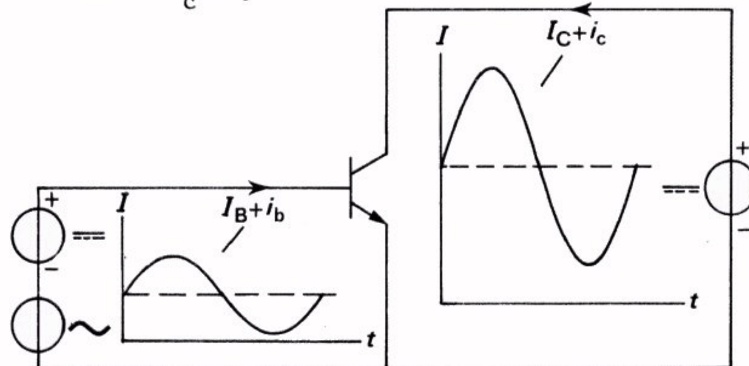
• Praktisch voorziet men collector en basis vanuit één voedingsbron van gelijkspanning.
Omdat U_{BE} veel kleiner is dan de voedingsspanning moet er een grote weerstand R_B in de basisleiding worden aangebracht.





Vaak tekent men in schema's in plaats van de voedingsbron "twee horizontale lijnen" waartussen het schema is aangebracht.

• Voert men tezamen met een kleine gelijkstroom I_B en kleine wisselstroom i_b toe, dan gaat er tezamen met de veel grotere gelijkstroom I_C een veel grotere wisselstroom i_c lopen.



Er vindt wisselstroomversterking plaats.

• De verhouding $\frac{i_c}{i_b}$ noemt men de *wisselstroomversterkingsfactor*, aangeduid met h_{fe}:

$$h_{fe} = \frac{I_{ct}}{I_{bt}}$$

NAAM: ______ KLAS: ______

1. - Een lagentransistor is meestal vervaardigd uit het halfgeleidermateriaal: ______

- Hij bestaat uit drie delen, die genoemd worden:

______ , ______ en ______

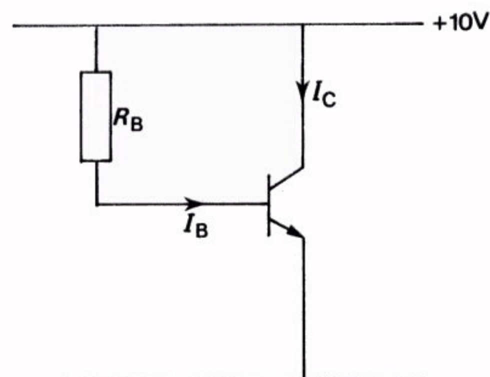
- Een transistor wordt voorzien van twee gelijkspanningen, die men aanduidt als:

______ en ______

- De gelijkstroomversterkingsfactor: h_{FE} = ______

De wisselstroomversterkingsfactor: h_{fe} = ______

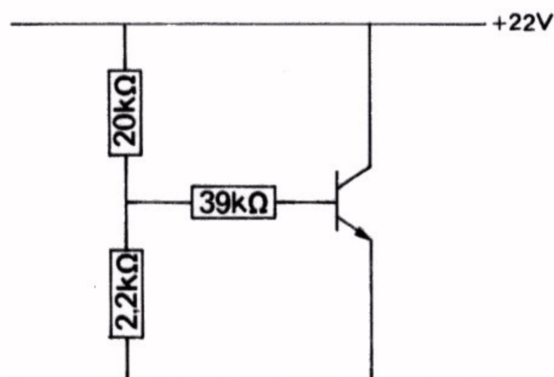
2.



De transistor in deze schakeling heeft een gelijkstroomversterkingsfactor h_{FE} = 100. De basisweerstand R_B = 50 kΩ. Bereken de collectorstroom:

I_C = ______ mA

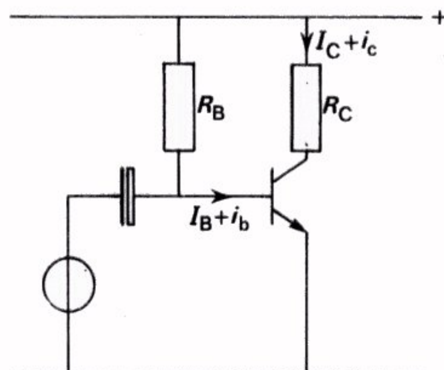
3.



De transistor die in deze schakeling wordt gebruikt heeft een h_{FE} = 90.
Bereken de collectorstroom:

$I_C \approx$ [ ]

4.



I_C = 10 mA en I_{ct} = 5 mA

h_{FE} = 250 en h_{fe} = 200

Bereken I_B en I_{bt}.

I_B = [ ]

I_{bt} = [ ]

Hoe groot is R_C als de amplitude van de wisselspanning over R_C 6 V bedraagt?

R_C = [ ]

B 208

SPANNINGSVERSTERKING MET EEN TRANSISTOR

INLEIDING

In de vorige les maakten we kennis met de lagentransistor. Het bleek mogelijk met een transistor zowel gelijk- als wisselstroom te versterken. We voerden de grootheid "gelijkstroomversterkingsfactor" in:

$$h_{FE} = \frac{I_C}{I_B}$$

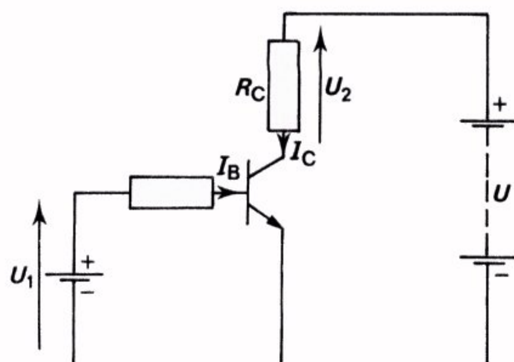
En bovendien de "wisselstroomversterkingsfactor":

$$h_{fe} = \frac{i_c}{i_b}$$

In deze les gaan we de spannings- en vermogensversterking bekijken.

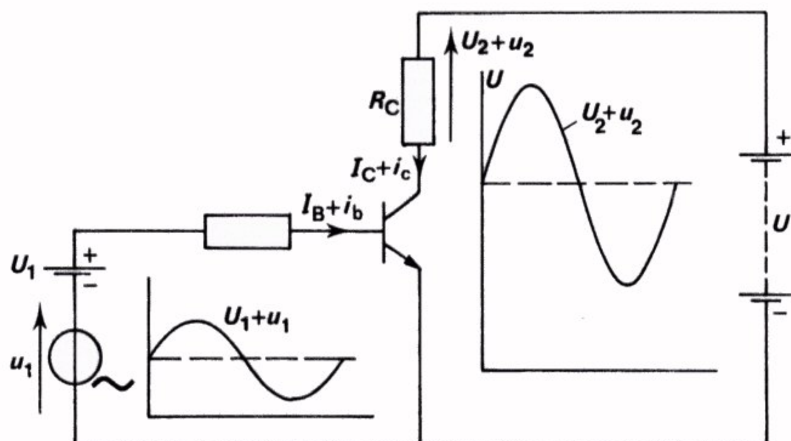
SPANNINGSVERSTERKING

Met behulp van een transistor is het ook mogelijk om spanning te versterken. Men moet dan een weerstand of impedantie in de collectorleiding opnemen. Door deze weerstand of impedantie loopt de collectorstroom, waardoor over deze component een spanning komt te staan die groter kan zijn dan de toegevoerde stuurspanning.
Op deze manier kan men wisselspanning versterken.



Hier wordt een kleine spanning U_1 toegevoerd die een kleine stroom I_B doet lopen.
Daardoor ontstaat een veel grotere stroom I_C die vergezeld gaat van gelijkspanning U_2 over R_C.

In de schakeling hieronder wordt behalve gelijkspanning ook een kleine wisselspanning u_1 toegevoerd. Deze doet in de basis een kleine wisselstroom i_b lopen. In de collector ontstaat dan een veel grotere wisselstroom i_c. De door R_c lopende i_c gaat vergezeld van een wisselspanning u_2 over R_c, die veel groter kan zijn dan u_1.



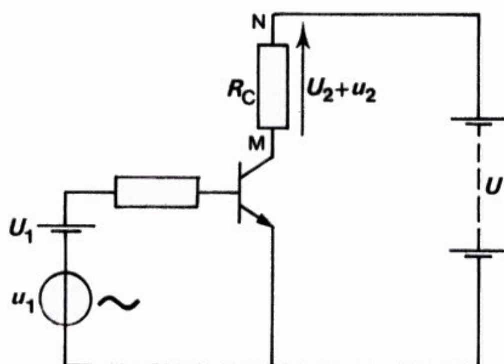
Er vindt een wisselspanningsversterking plaats, die gelijk is aan:

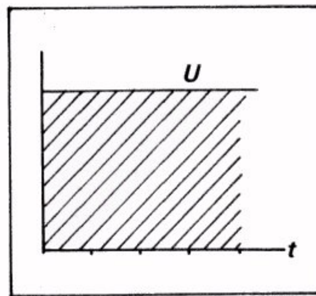
$$A_u = \frac{u_2}{u_1}$$

Een versterking duiden we aan met de hoofdletter A (Engels: "amplification").

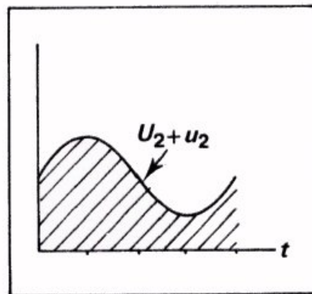
DE AF TE NEMEN SPANNING

Hier ziet u nogmaals de schakeling waarmee we wisselspanning kunnen versterken. Over R_c ontstaat de versterkte wisselspanning u_2. In de praktijk is het gewenst om de versterkte wisselspanning tussen een of ander punt en aarde ter beschikking te krijgen. R_c zit echter tussen de punten M en N en die liggen geen van beide aan aarde. De wisselspanning die over R_c staat is echter ook aanwezig tussen collector en emitter. Dit is als volgt in te zien.

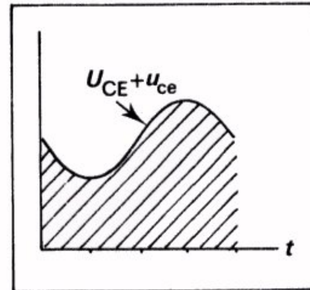


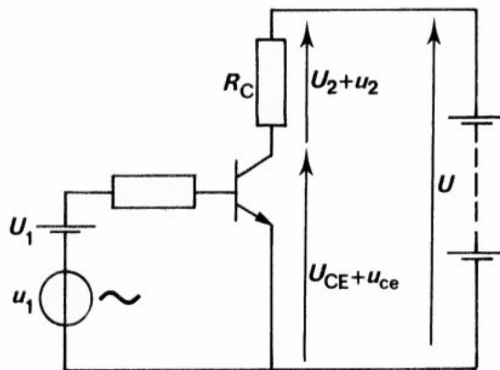


−



=

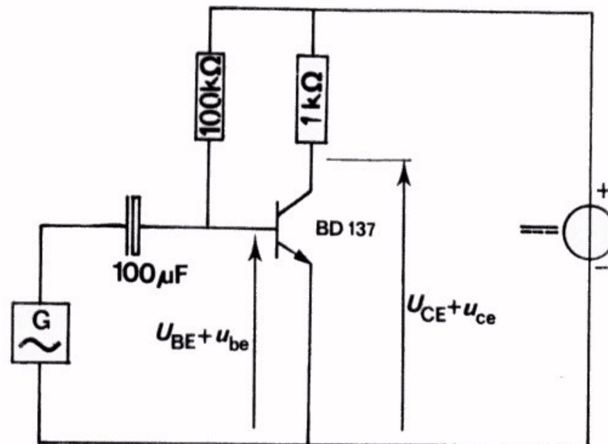




Als men van de voedingsspanning U de spanning $U_2 + u_2$ die over R_c staat aftrekt, dan houdt men de spanning over de transistor over. Deze spanning is $U_{CE} + u_{ce}$ en daarin is de wisselspanningscomponent u_{ce} dezelfde als de wisselspanning u_2.

Praktisch neemt men de versterkte wisselspanning af over de transistor, zoals in de figuur hiernaast is getekend.

OPDRACHT: HET BEPALEN VAN A_u.



- Bouw deze schakeling. Stel de gelijkspanning in op 10 V.
- Voer een wisselspanning toe van 1 kHz, uit de 600 Ω-uitgang. Stel de wisselspanningsgenerator zo in dat $U_{be(t)}$ = 10 mV. Doe dit met behulp van de oscilloscoop met:

  "*Y*-AMPL" in stand 5 mV/div.
  en "0-*AC*-*DC*" in stand *AC*.

- Meet vervolgens de spanning u_{ce} met de oscilloscoop.

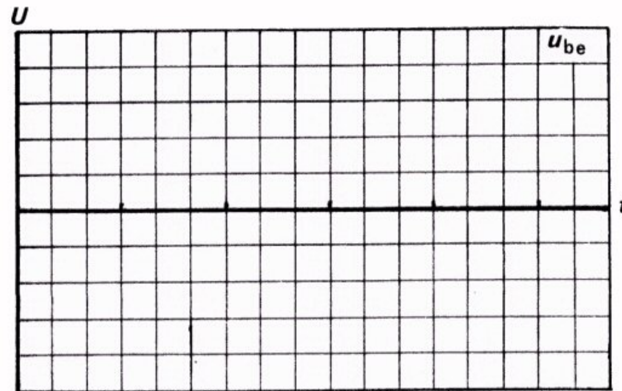
  $U_{ce(t)}$ = [mV]

- De wisselspanningsversterking is:

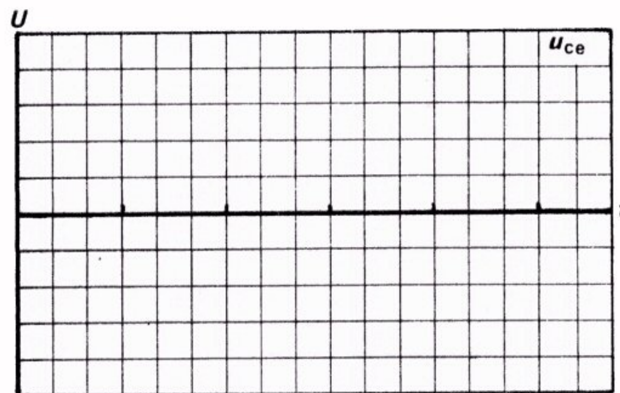
  $$A_u = \frac{U_{ce(t)}}{U_{be(t)}} = \frac{\qquad}{10} = \boxed{\qquad}$$

  U ziet dat er inderdaad een flinke wisselspanningsversterking optreedt.
- Zet de schakelaar van stand *AC* in stand *DC* en maak $U_{CE} + u_{ce}$ zichtbaar. U ziet inderdaad de wisselspanning u_{ce} en de gelijkspanning U_{CE}.
- Sluit vervolgens weer $U_{BE} + u_{be}$ aan op de oscilloscoop en trigger hem extern met de spanning $U_{CE} + u_{ce}$.

  U kunt nu de pulserende gelijkspanning $U_{BE} + u_{be}$ waarnemen.
- Schakel weer over in stand *AC*.
  Let op hoe de sinusoïde van u_{be} begint bij deze extern getriggerde oscilloscoop. Schets de sinusoïde op de volgende pagina.



- Sluit hierna nog eens u_{ce} aan op de oscilloscoop met behoud van dezelfde externe triggering. Schets hieronder wat u nu ziet.

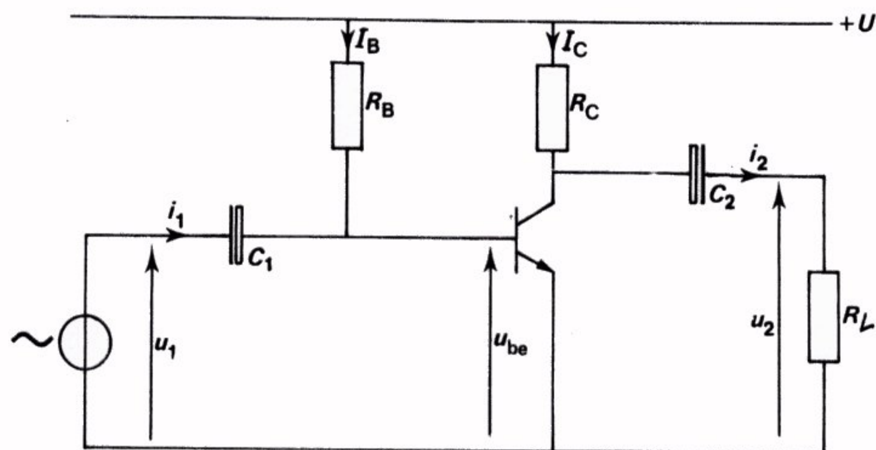


- Als u de grafieken van u_{be} en u_{ce} vergelijkt, ziet u dat in de gebruikte versterkingsschakeling de fase van de wisselspanning 180^0 verandert.

EEN VOORBEELD VAN EEN VERSTERKTRAP VOOR WISSELSPANNING.

Bij de laatste opdracht hebben we kennis gemaakt met een transistorschakeling, waarmee zowel wisselstroom als wisselspanning werd versterkt.

Hier is de volledige schakeling nogmaals getekend.



De wisselspanning u_1 die we willen versterken wordt via de scheidingscondensator C_1 aan de schakeling toegevoerd.

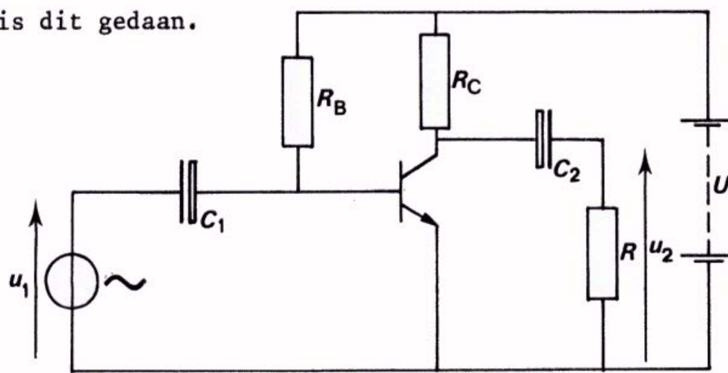
C_1 zorgt ervoor dat er voor gelijkstroom geen kortsluiting ontstaat tussen basis en emitter via de wisselspanningsbron. Voor wisselstroom vormt $\frac{1}{\omega C_1}$ wél een kortsluiting, zodat $u_{be} = u_1$.

Verder gaan we er vanuit dat de weerstand R alleen de versterkte wisselspanning moet afnemen en geen gelijkspanning. Hiervoor is de tweede scheidingscondensator C_2 aangebracht, die wél wissel- maar geen gelijkspanning doorlaat.

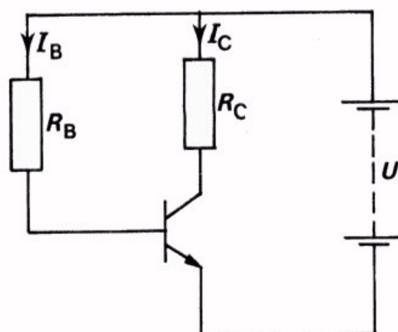
HET GELIJK- EN HET WISSELSTROOMSCHEMA

In het voorbeeld van de schakeling op vorig blad kwam zowel het gelijkstroom- als het wisselstroomgedrag ter sprake. Het is erg belangrijk deze beide niet te verwarren. Het is dan ook verstandig om naast het complete schema een afzonderlijk wisselstroomschema en een afzonderlijk gelijkstroomschema te tekenen.

Hieronder is dit gedaan.

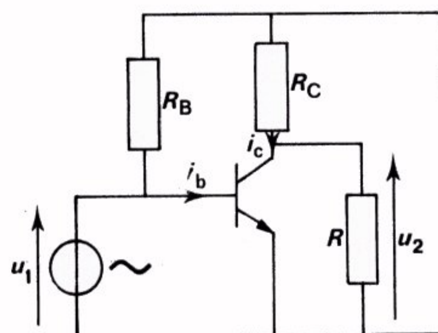


GELIJKSTROOMSCHEMA

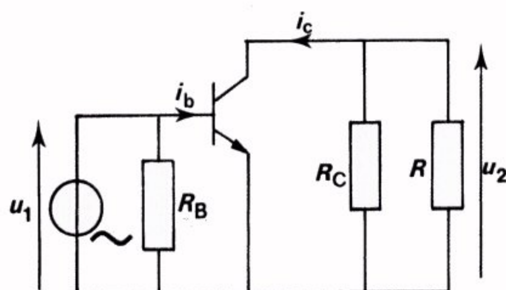


Door de condensators loopt geen gelijkstroom en dus door de wisselspanningsbron en de belastingsweerstand ook niet. Daarom zijn deze hier weggelaten.

WISSELSTROOMSCHEMA

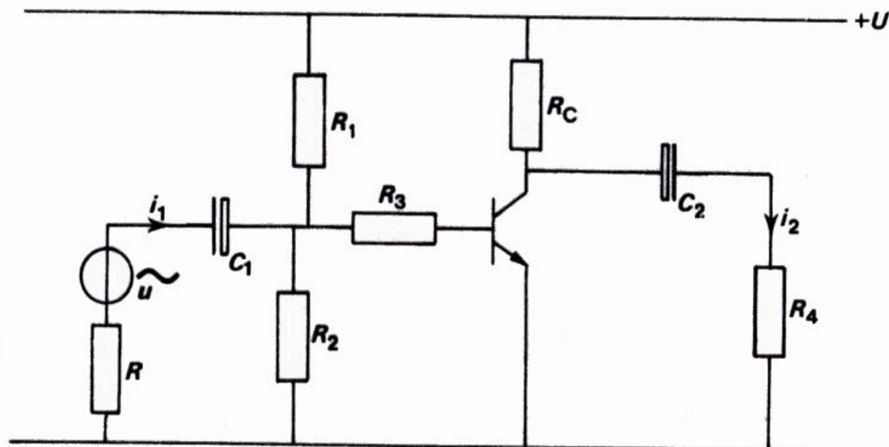


of iets anders getekend:



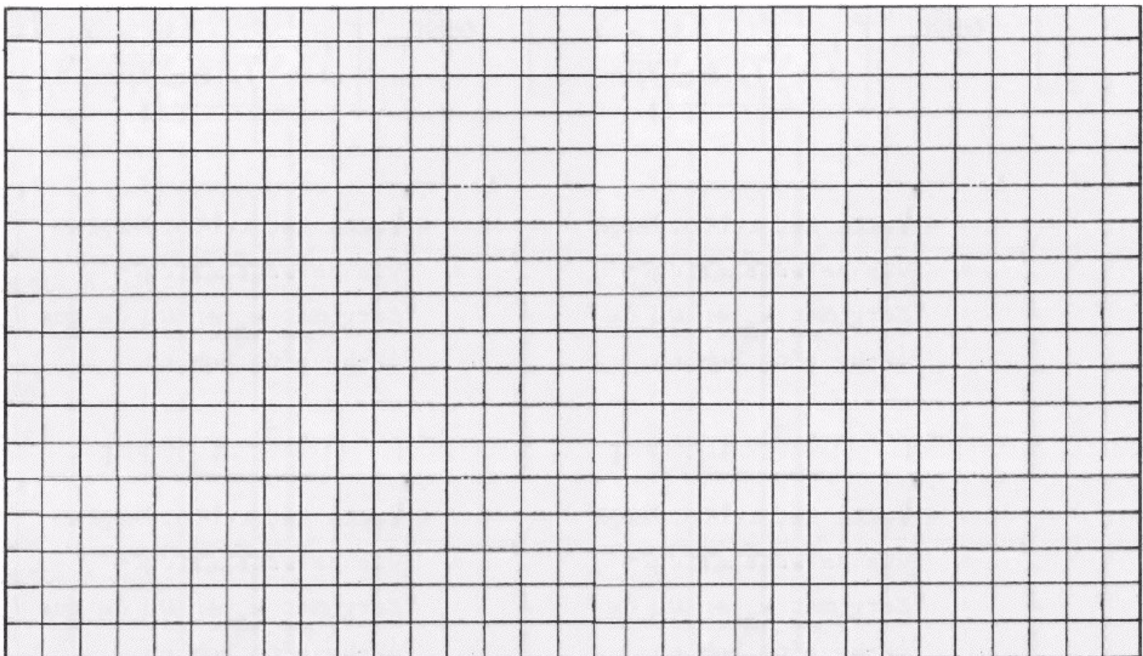
C_1, C_2 en de voedingsbron zijn voor wisselstroom kortsluitingen. Daarom zijn zij hier weggelaten.

OEFENING



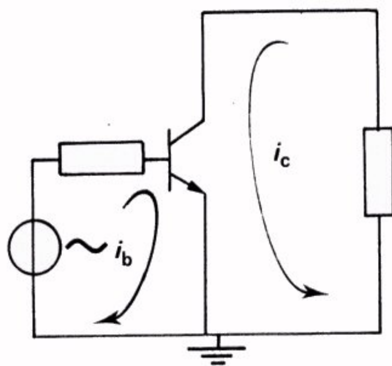
Teken hieronder het gelijk- en het wisselstroomschema van bovenstaande schakeling.

Geef bovendien in deze schema's aan: I_B, I_C, U_{BE}, U_{CE}, i_1, i_b, i_c, i_2, u_{be}, u_{ce} en alle weerstanden.



gelijkstroomschema wisselstroomschema

DE GEAARDE EMITTERSCHAKELING (GES)

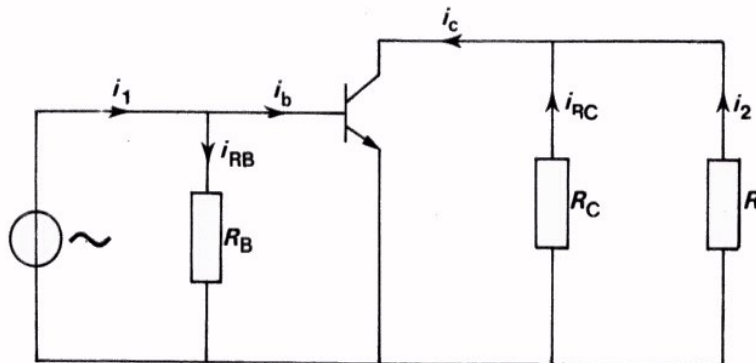


Hiernaast is nog eens een eenvoudig wisselstroomschema getekend van de versterkingsschakeling die we tot nu toe hebben besproken. In deze schakeling kunnen we onderscheiden een ingangscircuit en een uitgangscircuit. In het ingangscircuit loopt de ingangsstroom i_b, in het uitgangscircuit de uitgangsstroom i_c.

Omdat genoemde circuits de emitter-aansluiting gemeenschappelijk hebben, noemt men deze transistorschakeling de *schakeling met gemeenschappelijke emitteraansluiting*. In de praktijk spreekt men gewoonlijk van de Gemeenschappelijke Emitter Schakeling, afgekort GES. Vaak wordt de schakeling kortweg "emitterschakeling" genoemd.

De GES is de meest toegepaste transistorschakeling. Daarom is deze tot nu toe steeds ter sprake gekomen. Er zijn nog twee andere schakelingen mogelijk, die later behandeld worden. Voorlopig beperken we ons tot de GES.

We kunnen nu de uitdrukkingen h_{FE} en h_{fe} uitleggen. Beide geven de verhouding van een uitgangsstroom tot een ingangsstroom weer. De E en e willen zeggen dat het stromen van de emitterschakeling of GES zijn.
De F en f zijn de eerste letters van het engelse woord "forward" (= "voorwaarts"), waarmee men wil zeggen hoe de stroom "naar voren" versterkt wordt door de transistor.



We geven hier nog eens het wisselstroomschema

In deze schakeling treedt wisselstroomversterking op. Aan de schakeling wordt een kleine wisselstroom i_1 geleverd, terwijl de grotere wisselstroom i_2 aan de belastingweerstand R wordt afgegeven. De *wisselstroomversterking* aangeduid met A_i, bedraagt:

$$\boxed{A_i = \frac{i_2}{i_1}.}$$

We merken op dat de wisselstroom*versterking* A_i kleiner is dan de wisselstroom*versterkingsfactor*

$$h_{fe} = \frac{i_c}{i_b},$$

die we in de vorige les besproken hebben. Dit komt omdat in bovenstaand schema: i_2 kleiner dan i_c

i_1 groter dan i_b.

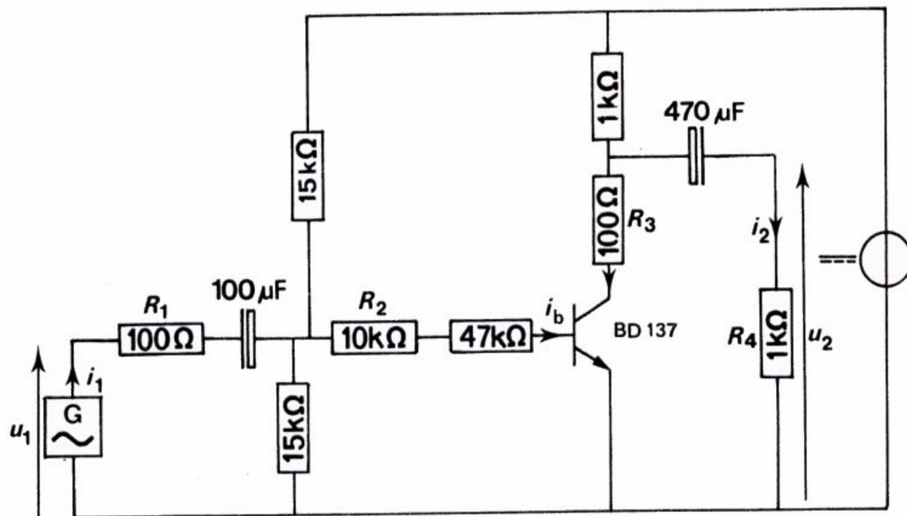
We moeten dus goed onderscheid maken tussen:

de stroom*versterkingsfactor* h_{fe}, die een gegeven van "de transistor alléén" is en onafhankelijk van de schakeling,

en de stroom*versterking* A_i, die een gegeven van de gehele schakeling is en afhangt van de gekozen weerstanden.

We herinneren eraan dat we ook over de wissel*spannings*versterking A_u hebben gesproken. A_u heeft evenals A_i te maken met de gehele schakeling en is geen gegeven van de transistor alléén.

OPDRACHT: HET METEN VAN A_i EN h_{fe}.



- Verander de schakeling op uw paneel in bovenstaande en stel de voedingsspanning in op 30 V.
- Voer vanuit de 600 Ω-uitgang van de LF-generator een wisselstroom $I_{1(eff)}$ toe van 500 µA bij 1 kHz. Meet deze stroom met een elektronische universeelmeter door spanningsmeting over de weerstand R_1 aan de ingang van de schakeling.
- Bepaal daarna met deze universeelmeter de waarden van i_b, i_c en i_2 door meting van de spanning over de weerstanden R_2, R_3 en R_4 in de schakeling.

$I_{b(eff)}$ = ☐ ; $I_{c(eff)}$ = ☐ ; $I_{2(eff)}$ = ☐

- Bereken

h_{fe} = ☐

$\frac{i_b}{i_1}$ = ☐

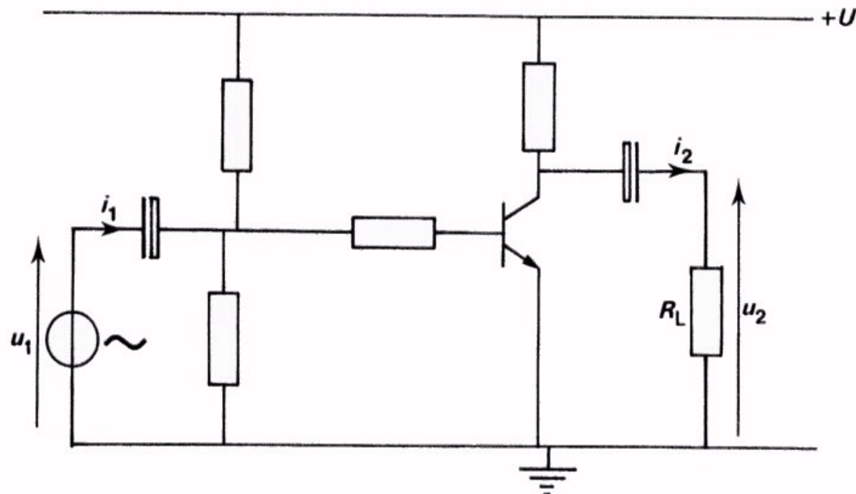
$\frac{i_2}{i_c}$ = ☐

A_i = ☐

- Breek de schakeling nog niet af.

DE VERMOGENSVERSTERKING A_p.

Dit is een versterkertrap zoals die bij vorige meetopdracht gebruikt werd.



Aan deze schakeling wordt een wisselspanning u_1 en een wisselstroom i_1 toegevoerd. Dit betekent dat er een wisselstroomvermogen $P_i = U_{1(eff)} . I_{1(eff)}$ wordt toegevoerd. Verder levert de schakeling aan de belastingsweerstand R_L een wisselspanning u_2 en een wisselstroom i_2. Dit houdt in dat aan de belasting het wisselstroomvermogen $P_u = U_{2(eff)} . I_{1(eff)}$ wordt doorgegeven. Het vermogen P_u kan wel groter zijn dan P_i. We zeggen dan dat er (wisselstroom) vermogensversterking A_p plaatsvindt. Deze is gelijk aan:

$$A_p = \frac{P_u}{P_i} = \frac{U_{2(eff)} . I_{2(eff)}}{U_{1(eff)} \; I_{1(eff)}}$$

Als we bedenken dat:

$\frac{u_2}{u_1} = A_u$ en $\frac{i_2}{i_1} = A_i$,

dan is voor A_p ook te schrijven:

$A_p = \frac{u_2 . i_2}{u_1 . i_1} = A_u \; . \; A_i$, of

$$A_p = A_u \; . \; A_i$$

OPDRACHT: BEPALING VAN A_u EN A_p.

- Meet in de schakeling op het paneel nu ook:

$U_{1(eff)}$ = [ ]

$U_{2(eff)}$ = [ ]

- Bepaal A_u = [ ]

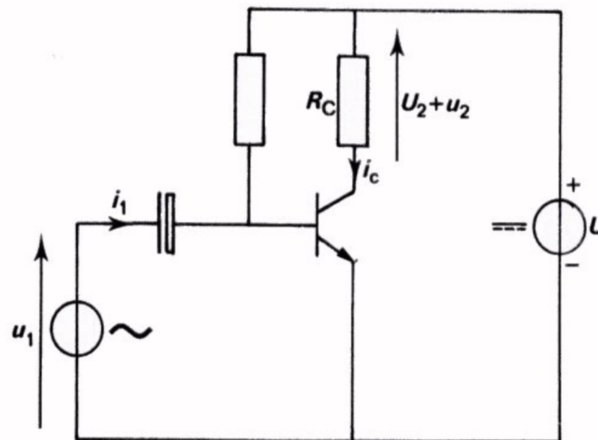
- Bereken de vermogensversterking:

$$A_p = \frac{U_{2(eff)} \cdot I_{2(eff)}}{U_{1(eff)} \cdot I_{1(eff)}} = ________ = [\quad]$$

CONCLUSIE

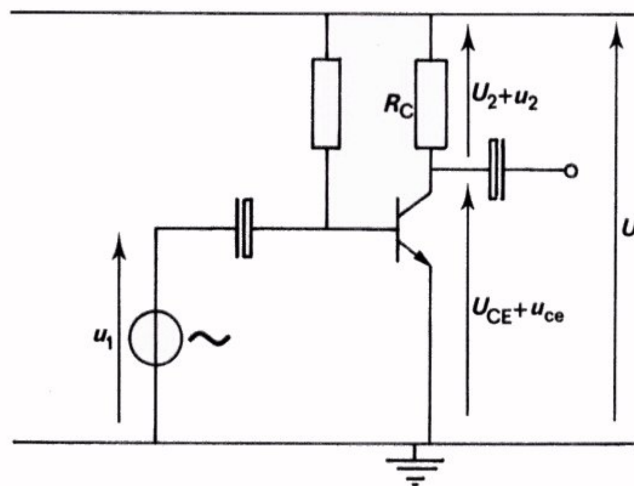
In de vorige les hebben we gesteld dat de transistor een *actieve* component is. Dit wil zeggen dat men er een wisselstroomvermogen mee kan versterken. Uit het resultaat blijkt dat hier nog juist sprake is van vermogensversterking. Dat A_p niet groter uitvalt ligt aan het gekozen schema; de keuze van het schema is mede bepaald door de andere dingen die we u wilden laten meten. De transistor is echter een actieve component omdat daarmee vermogensversterking *mogelijk* is.

•



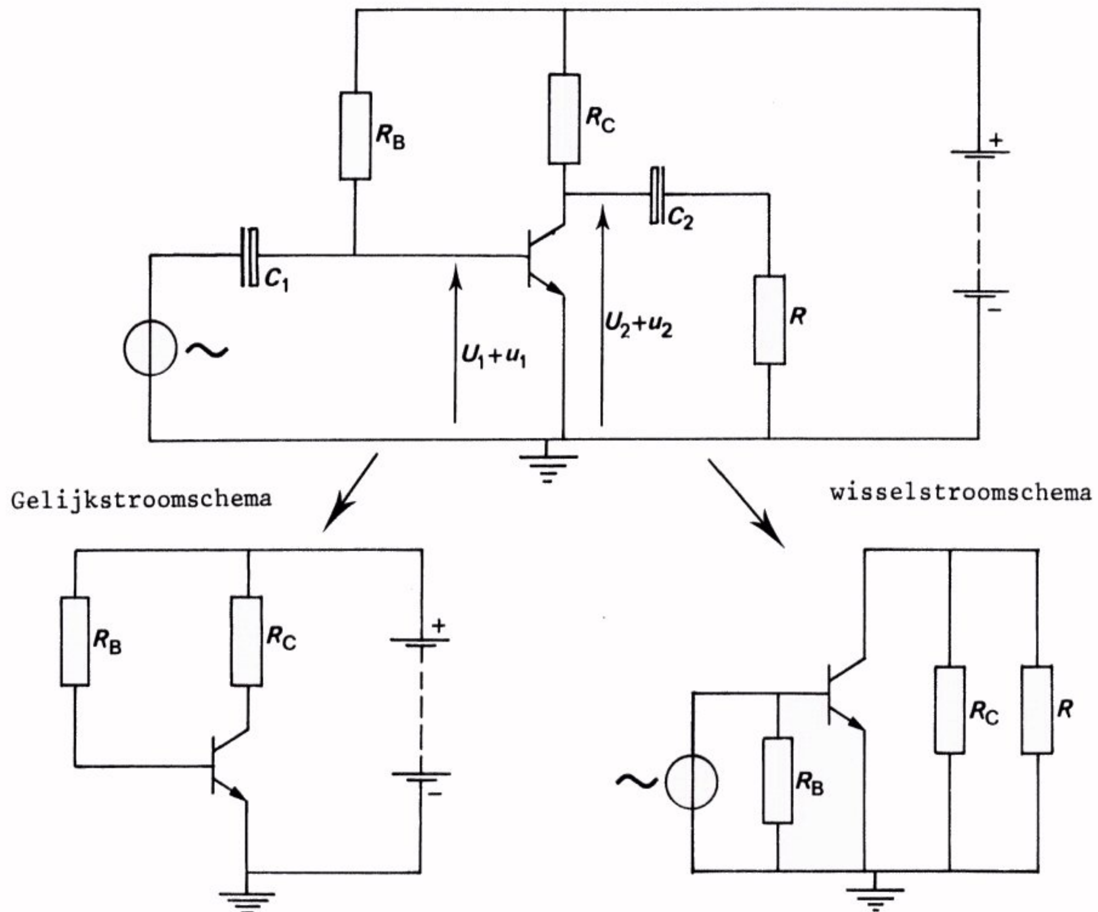
Als men de versterkte wisselstroom i_c door een weerstand R_C laat lopen, ontstaat er over R_C een wisselspanning u_2 die veel groter kan zijn dan de toegevoerde u_1. Er kan *wisselspanningsversterking* optreden.

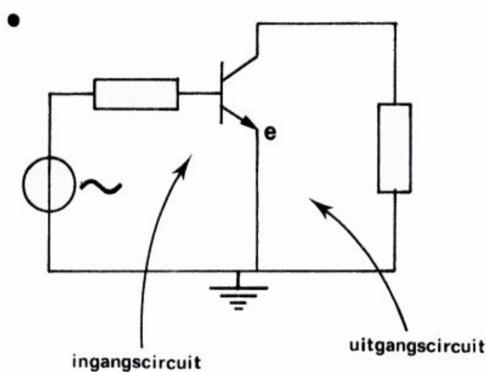
•



De wisselspanning u_2 die over R_C staat, is ook aanwezig over de transistor tussen collector en emitter. Meestal neemt men niet u_2 maar u_{ce} af, omdat de laatste aan één kant aan aarde ligt. C_2 is een koppelcondensator die dient om de gelijkspanning U_{CE} te blokkeren.

• Vaak is het nuttig om een compleet schema op te splitsen in een gelijkstroomschema en een wisselstroomschema.



• 

De meest toegepaste transistorschakeling is die, waarbij ingangs- en uitgangscircuit voor wisselstroom de emitteraansluiting gemeenschappelijk hebben.
Het is de schakeling met gemeenschappelijke emitteraansluiting of *geaarde emitter schakeling* (GES) of "emitterschakeling".

- De wisselstroom*versterking* A_i, de wisselspannings*versterking* A_u en de wisselstroomvermogen*versterking* A_p hebben betrekking op de gehele schakeling. Hun grootte hangt niet alleen af van de gebruikte transistor, maar ook van de aanwezige weerstanden.

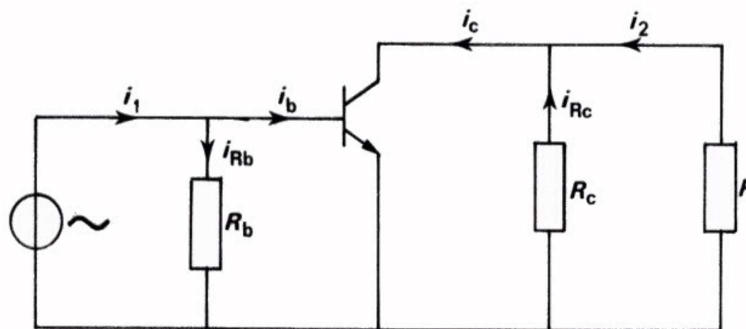
- $A_p = A_u \cdot A_i$

- De stroom*versterkingsfaktor* h_{fe} heeft betrekking op de transistor alléén:

$$h_{fe} = \frac{i_c}{i_b}$$

- $A_i < h_{fe}$, omdat $i_b < i_1$

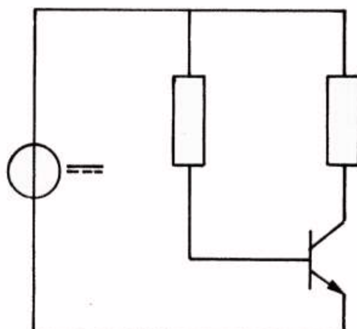
  en $i_2 < i_c$.



NAAM: ____________ KLAS: ____________

OEFENINGEN

1.



Waaraan kunt u zien of de + van de voedingsbron boven, resp. beneden dient te zitten?

____

____

____

____

____

____

2. Waaraan kunt u zien dat u met de wisselstroomversterkingsfactor heeft te doen en *niet* met de gelijkstroomversterkingsfactor?

____

____

____

____

3. Met welke letter geeft men een versterking aan? Met [ ]

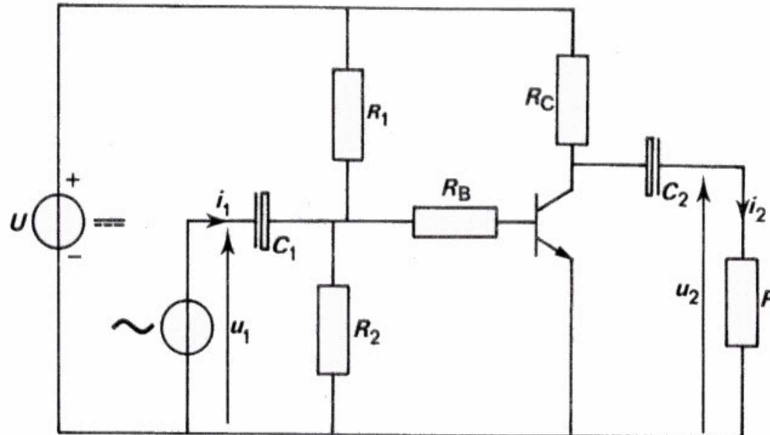
Geef het juiste symbool voor:

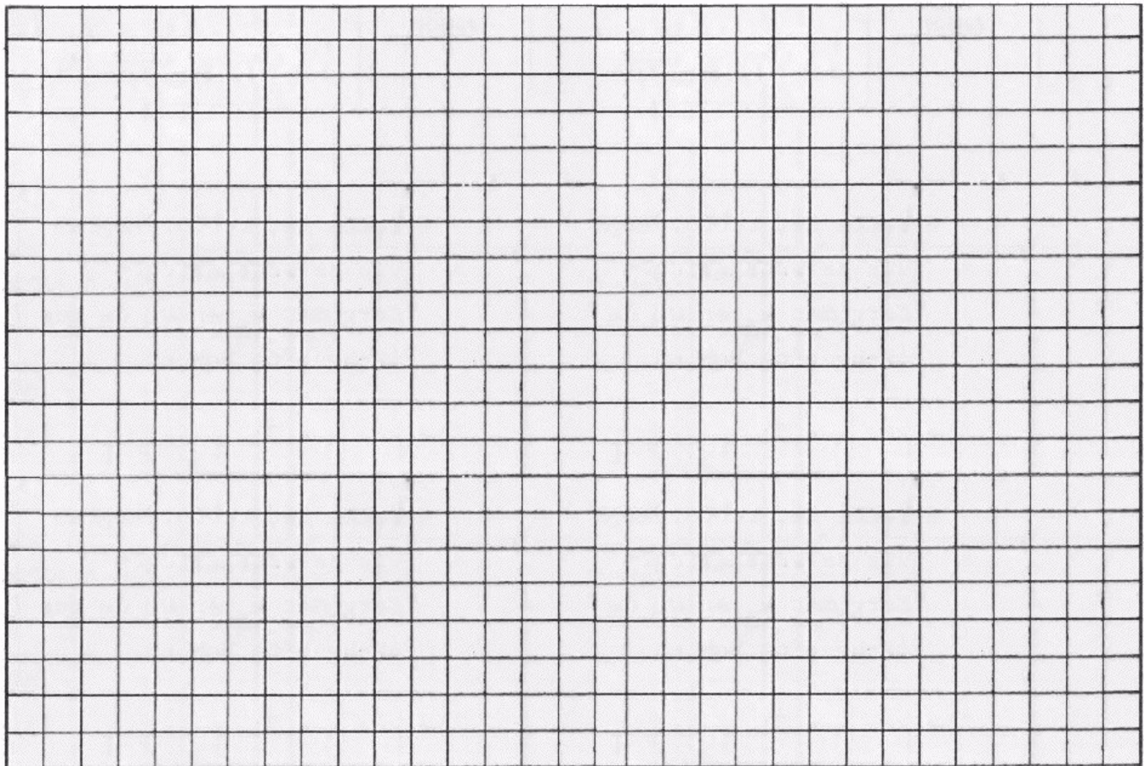
gelijkspanningsversterking	[ ]
wisselspanningsversterking	[ ]
gelijkstroomversterking	[ ]
wisselstroomversterking	[ ]
vermogensversterking	[ ]

4. Hier is een voorbeeld getekend van een compleet schema van een GES. Voor wisselstroom zijn

$$\frac{1}{\omega C_1} \text{ en } \frac{1}{\omega C_2} \text{ praktisch nul.}$$

Teken het gelijkstroom- en het wisselstroomschema. Geef in deze schema's aan: I_B, I_C, i_1, i_2, u_1, u_2 en de diverse weerstanden.



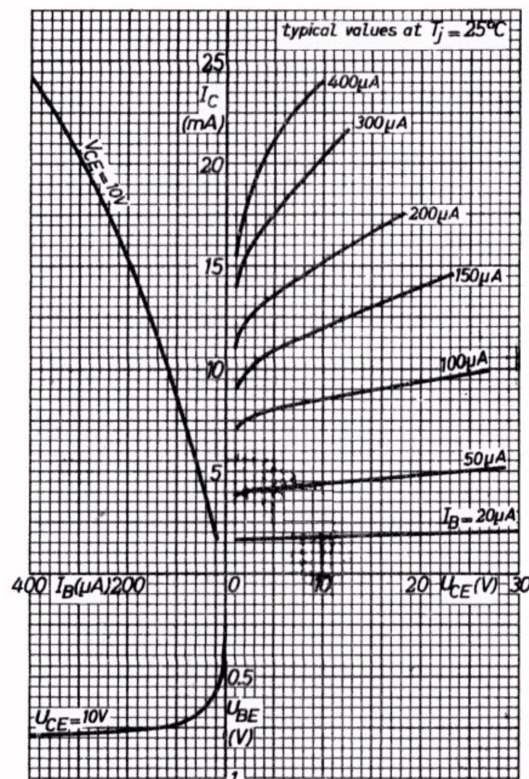


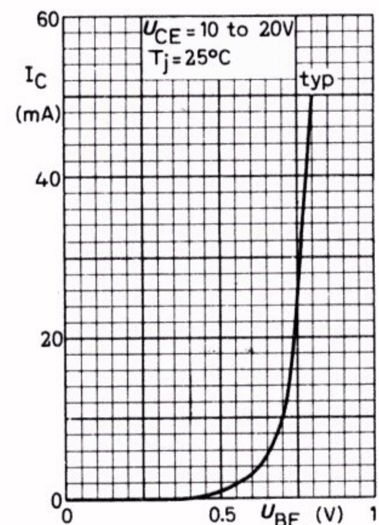
B 209

KARAKTERISTIEKEN BIJ EEN TRANSISTOR

INLEIDING

Het gedrag van een diode is zoals we gezien hebben goed te begrijpen aan de hand van de diode-karakteristiek.
Om het gedrag van een transistor goed in te zien wordt ook gebruik gemaakt van karakteristieken. Omdat een transistor een ingewikkelder component is dan een diode, (hij heeft een aansluiting méér), zijn er verschillende transistorkarakteristieken in gebruik.
Fabrikanten van transistors publiceren deze karakteristieken in een zogenaamd *data handbook* (= boek met gegevens). Hieronder ziet u een aantal karakteristieken van één transistor uit zo'n publikatie.





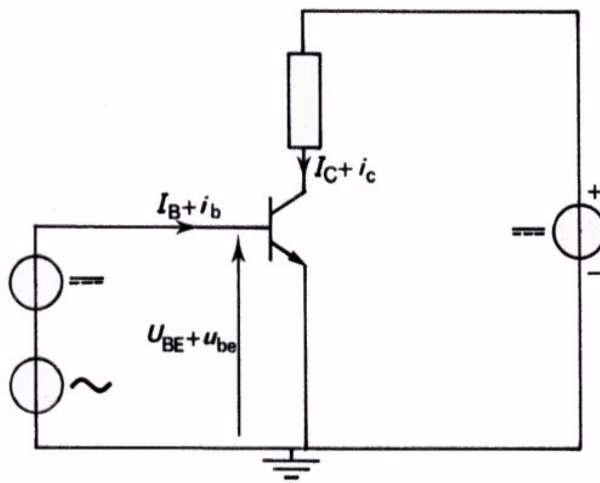
In deze les gaan we twee karakteristieken van de transistor bespreken:

de I_B - U_{BE} - of ***ingangskarakteristiek***,

en de I_C - U_{BE} - of ***overdrachtskarakteristiek***.

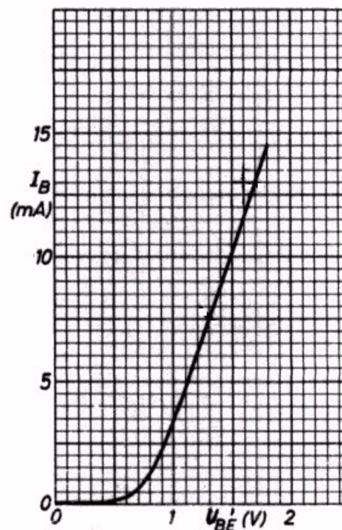
DE INGANGSKARAKTERISTIEK

We geven hieronder nog eens het principeschema van een GES. De verschillende stromen en spanningen die in deze schakeling optreden zijn in dit schema duidelijk aangegeven.



Aan de ingang hebben we te maken met de gelijkspanning U_{BE} en de gelijkstroom I_B; verder met de wisselspanning u_{be} en de wisselstroom i_b.

Het verband tussen de ingangsgelijkstroom I_B en de ingangsgelijkspanning U_{BE} kan men in een grafiek weergeven. Hiernaast is zo'n grafiek getekend. Omdat de grafiek het verband aangeeft tussen stroom en spanning aan de ingang van de transistor, noemt men deze de *ingangskarakteristiek.*



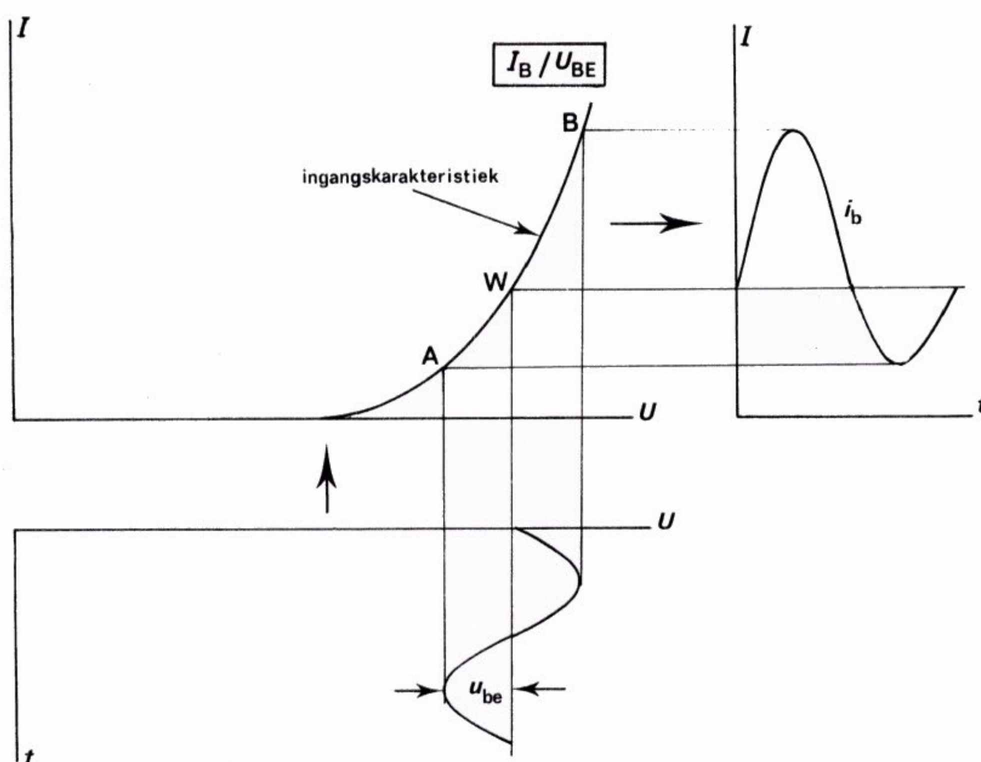
We hebben gezien dat het transistordeel tussen basis en emitter is op te vatten als een diode.

Het is dus aannemelijk dat deze ingangskarakteristiek verloopt als de bekende diodekarakteristiek in doorlaatrichting. We weten dat deze karakteristiek niet recht is maar een zekere kromming vertoont. Het "niet-recht-zijn" van de ingangskarakteristiek kan nu het verschijnsel van *vervorming* veroorzaken. Op volgend blad gaan we dit bekijken.

NIET-LINEAIRE VERVORMING

Als men behalve de instelspanning U_{BE} nog een sinusvormige wisselspanning u_{be} aan de transistoringang toevoert kan er een wisselstroom i_b gaan lopen die *niet* sinusvormig is. Dit is het geval als u_{be} zó groot is, dat het deel AB van de ingangskarakteristiek niet meer als vrijwel recht is te beschouwen.

Hieronder is het verloop van de basisstroom geconstrueerd bij een gegeven basisspanning.

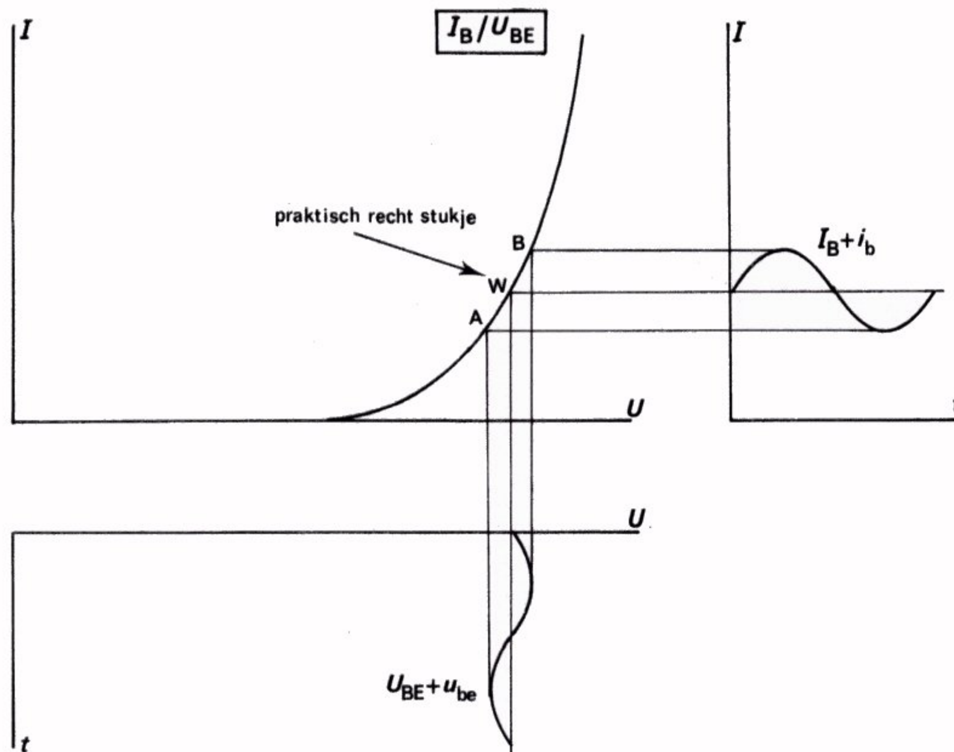


Terwijl u_{be} sinusvormig verloopt, doet i_b dit niet. We zeggen dan dat i_b "vervormd" is.

De oorzaak van de vervorming is het *niet-lineaire* verloop van de ingangskarakteristiek. Men noemt deze vervorming daarom *niet-lineaire vervorming*.

KLEINE SIGNALEN AAN DE INGANG VAN DE GES

Bij kleine signalen, d.w.z. als $u_{be} << U_{BE}$, treedt vrijwel geen vervorming op. Er wordt dan maar een klein stukje van de ingangskarakteristiek gebruikt en dat mag men als praktisch recht beschouwen. Hieronder is dezelfde constructie als op het vorig blad uitgevoerd, maar nu voor een kleine wisselspanning u_{be}.



DE INGANGSWISSELSTROOMWEERSTAND

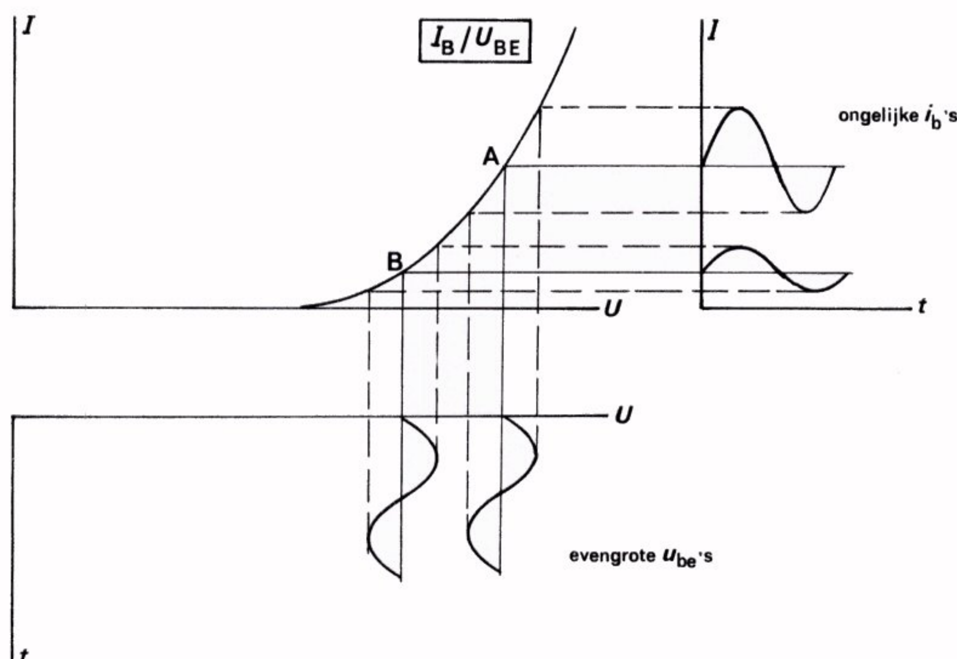
In het voorafgaande zijn spanningen en stromen aan de ingang van de geaarde emitter schakeling ter sprake geweest: de gelijkspanning U_{BE} en de gelijkstroom I_B, de wisselspanning u_{be} en de wisselstroom i_b. Het quotiënt van de ingangswisselspanning en de ingangswisselstroom is de *ingangswisselstroomweerstand*

Deze geeft men aan met h_{ie}.

Ingangswisselstroomweerstand: $$h_{ie} = \frac{u_{be}}{i_b}$$

h_{ie} is niet constant, maar hangt af van de instelgelijkstroom I_B.

Dit is als volgt met behulp van de ingangskarakteristiek te begrijpen.



Hier zijn twee instellingen vergeleken. Bij A is de instelstroom I_B groter dan bij B. De ingangswisselspanningen u_{be} zijn bij A en B even groot. De ingangswisselstroom i_b is bij A echter duidelijk groter dan bij B. De ingangswisselstroomweerstand

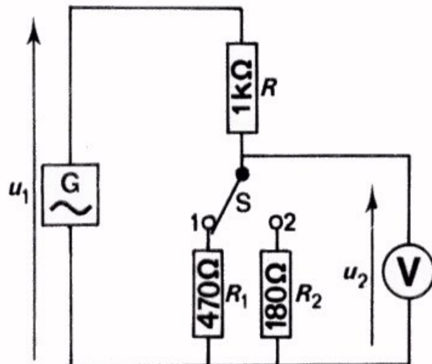
$$h_{ie} = \frac{u_{be}}{i_b}$$

is bij A dus kleiner.

CONCLUSIE

h_{ie} is kleiner naarmate I_B groter is. In een volgende opdracht gaan we dit ervaren.

OPDRACHT: METEN DAT EEN WEERSTAND KLEINER IS DAN EEN ANDERE.



- Bouw deze schakeling.
- Voer een wisselspanning $U_{1(eff)}$ toe van 150 mV bij f = 1 kHz.
- De spanning u_1 verdeelt zich nu over de weerstanden R en R_1. We meten de deelspanning over R_1.

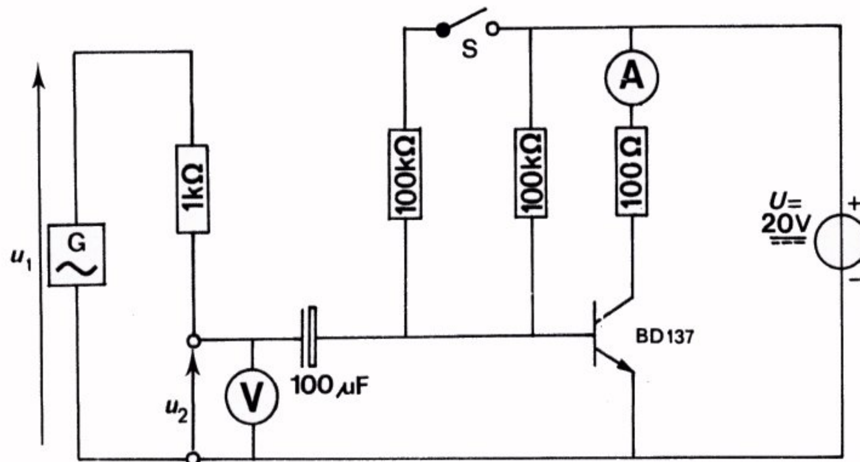
$U_{2(eff)}$ = [mV]

- Daarna zetten we de schakelaar in stand 2. R_1 = 470 Ω is nu vervangen door een *kleinere* weerstand R_2 = 180 Ω. We meten opnieuw u_2.

$U_{2(eff)}$ = [mV]

- We hebben nu gezien dat bij constante u_1 over een *kleinere* weerstand een *kleinere* spanning staat.
- Het omgekeerde is ook waar. Als over een weerstand R_2 een kleinere spanning staat dan over een weerstand R_1, is deze R_2 kleiner dan R_1.
- Dit nu gaan we toepassen in een volgende opdracht. Daarin vervangen we de weerstand R_1 door de ingangswisselstroomweerstand h_{ie} van een GES. De grootte van deze h_{ie} bij een bepaalde I_C-waarde vergelijken we dan met de h_{ie} bij een grotere I_C-waarde.

OPDRACHT: METEN DAT h_{ie} AFNEEMT ALS I_C TOENEEMT.



- Bouw bovenstaande schakeling.
- Houd schakelaar S eerst open. Voer U = 20 V en $U_{1(eff)}$ = 150 mV bij f = 1 kHz toe.
- Meet I_C en u_2.

I_C = [mA]

$U_{2(eff)}$ = [mV]

- Sluit schakelaar S waardoor I_B en dus ook I_C toeneemt.
- Meet opnieuw I_C en u_2.

I_C = [mA]

$U_{2(eff)}$ = [mV]

- Breek de schakeling nog niet af.

KONKLUSIE:

Door S te sluiten neemt I_C [toe/af]

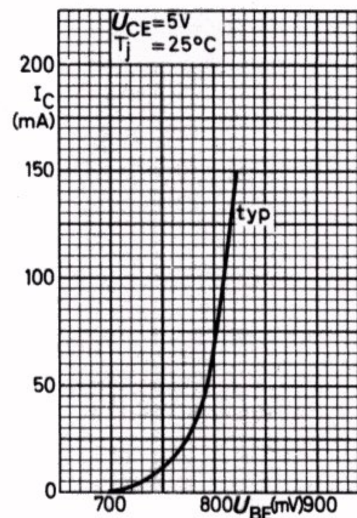
hierdoor neemt u_2 [toe/af]

en dit betekent dat h_{ie} dan is [toe/af] genomen.

Hoe groter I_C, des te [ ] h_{ie}.

Op blad B209.3 hebben we gezien dat een grote u_{be} een vervormde i_b oplevert. Dat u_{be} een vervormde i_b tot gevolg heeft is op zichzelf niet zo erg. Maar een vervormde basiswisselstroom i_b veroorzaakt op zijn beurt een vervormde collectorwisselstroom i_c en dit is dikwijls zeer ongewenst. Omdat men vaak geïnteresseerd is in het directe verband tussen ingangsspanning en de uitgangsstroom, gebruikt men de I_C - U_{BE} - *karakteristiek.* Deze wordt een *overdrachtskarakteristiek* genoemd, omdat hij iets zegt over de "overdracht" van de ingang- naar de uitgang van de transistor.

Hiernaast een voorbeeld van zo'n overdrachtskarakteristiek.

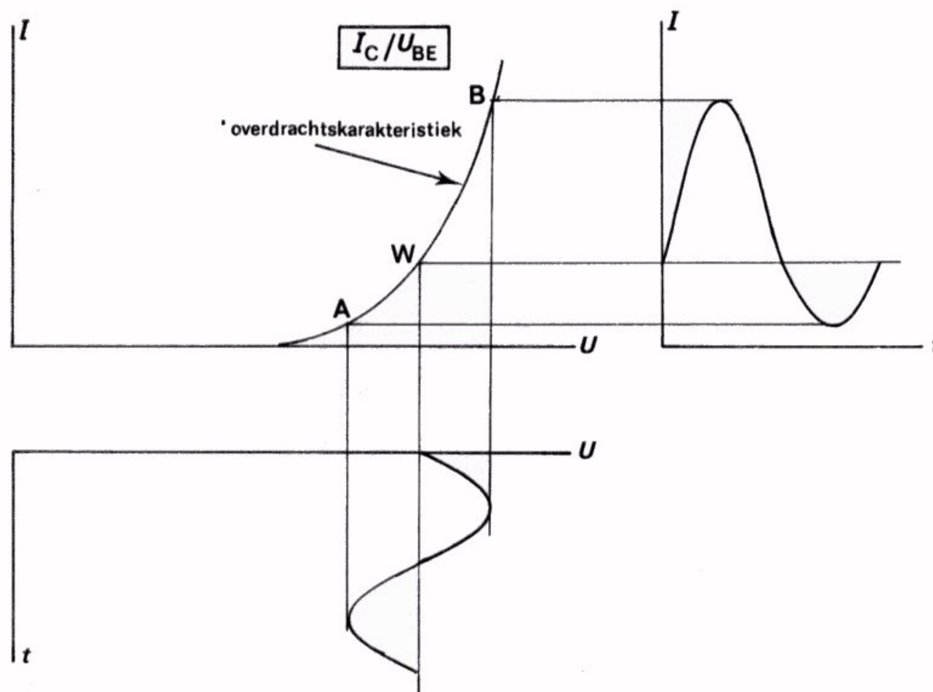


Deze overdrachtskarakteristiek ontstaat op eenvoudige wijze uit de I_B - U_{BE} - karakteristiek. We hebben immers geleerd dat:

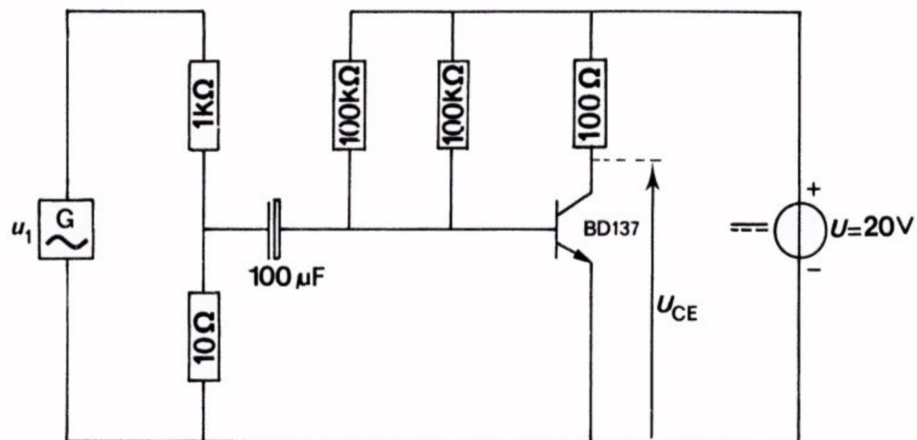
$$I_C = h_{FE} \cdot I_B.$$

I_C wordt dus uit I_B verkregen door vermenigvuldiging met de gelijkstroomversterkingsfactor h_{FE}.

In volgende figuur is ook het ontstaan van vervorming van de uitgangswisselstroom i_c ten gevolge van de kromming van de I_C - U_{BE} - karakteristiek geconstrueerd.



OPDRACHT: ZICHTBAAR MAKEN VAN DE NIET-LINEAIRE VERVORMING.

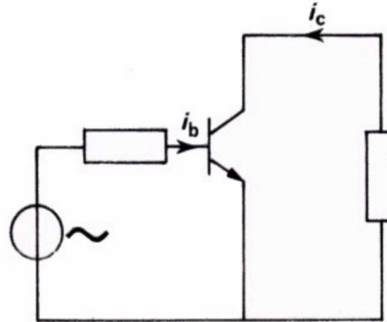


- Verander de schakeling op uw paneel in bovenstaande.
- Voer U = 20 V toe en sluit de oscilloscoop aan tussen collector en emitter, (stand *AC*).
- Voer een kleine wisselspanning u_1 van 1 kHz toe vanuit de 600 Ω-uitgang. Laat u_1 langzaam toenemen en kijk of de vorm van u_{ce} op den duur gaat afwijken van de sinusvorm.
- Merk op: u_{ce} is dezelfde wisselspanning als $R_C.i_c$, zodat de vervorming van u_{ce} die u ziet ook de vervorming van i_c is.

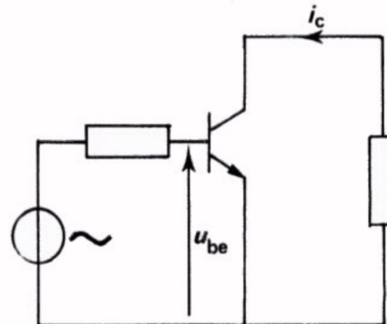
DE STEILHEID

We weten dat bij een GES een kleine wisselstroom i_b een grote wisselstroom i_c tot gevolg kan hebben. De wisselstroomversterkingsfactor is:

$$h_{fe} = \frac{i_c}{i_b}$$



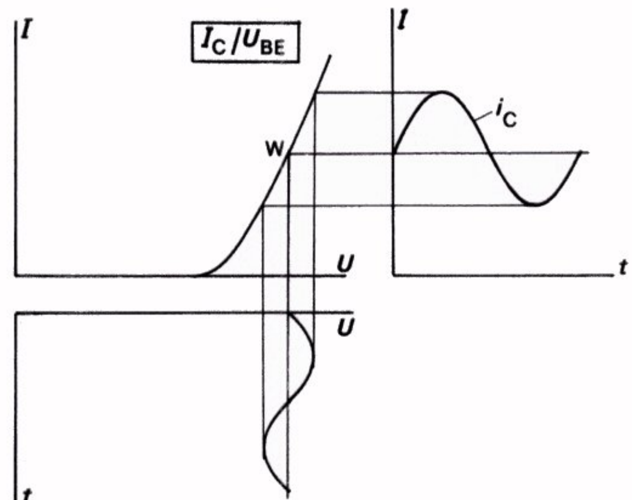
Als men een wisselstroom i_b toevoert, dan voert men tegelijkertijd een wisselspanning u_{be} toe.
Men kan daarom ook zeggen, dat een wisselspanning u_{be} een wisselstroom i_c veroorzaakt.



De overdrachtskarakteristiek nu legt een verband tussen de grootheden i_c en u_{be}.
Aan de hand van deze karakteristiek heeft men een nieuwe grootheid ingevoerd. Deze grootheid geeft de verhouding tussen de uitgangswissel*stroom* i_c en de ingangswissel*spanning* u_{be}.

Men noemt deze verhouding de *steilheid*, aangeduid met S:

$$S = \frac{i_c}{u_{be}}$$

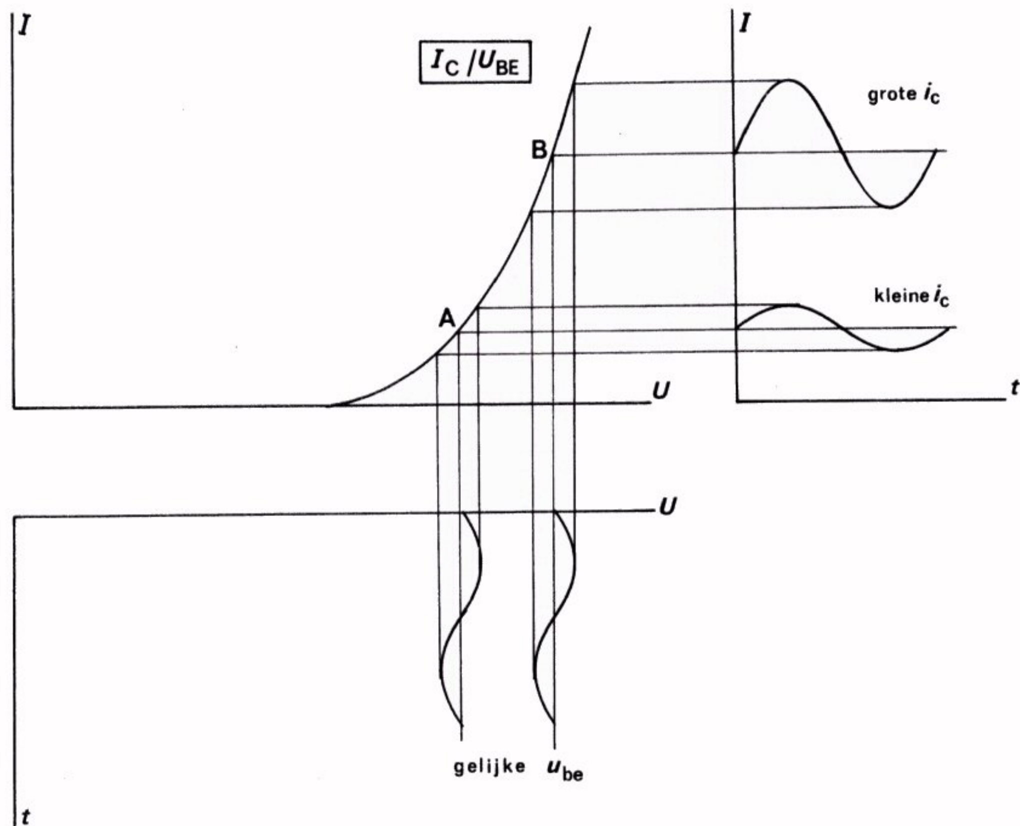


De naam "steilheid" heeft de maken met de I_C - U_{BE} - *karakteristiek*. Loopt deze "steiler", dan is S ook groter. Ga dit na in bovenstaande figuur.

De steilheid is het quotiënt van een stroom en een spanning.
De grootte van S drukt men dus uit in:

"ampère per volt", (A/V)
of "milliampère per volt", (mA/V), enz.

De steilheid S is een wisselstroomgrootheid, die afhangt van de gelijkstroominstelling.
Hoe groter I_C, des te groter S.
In de karakteristiek hieronder is dit onmiddellijk te zien.



Bij een lage gelijkstroominstelling in punt A ontstaat een kleine i_c bij een bepaalde u_{be}. Bij een hogere gelijkstroominstelling in punt B ontstaat een grotere i_c bij even grote u_{be}. De oorzaak ligt in het feit dat de steilheid van de overdrachtskarakteristiek in B groter is dan in A.

OPDRACHT: HET METEN VAN S

- Maak gebruik van de schakeling die zich op uw paneel bevindt. Zie schema blad B209.9. Maak R_B = 100 kΩ.
- Stel de gelijkspanning in op 20 V.

Voer $U_{(be)t}$ toe van 10 mV bij een frequentie van 1 kHz. Meet nu $U_{(ce)t}$.

$U_{(ce)t}$ = [mV]

- Hoe groot is nu I_{ct}? I_{ct} = [mA]
- Bereken de steilheid S = [mA/V]

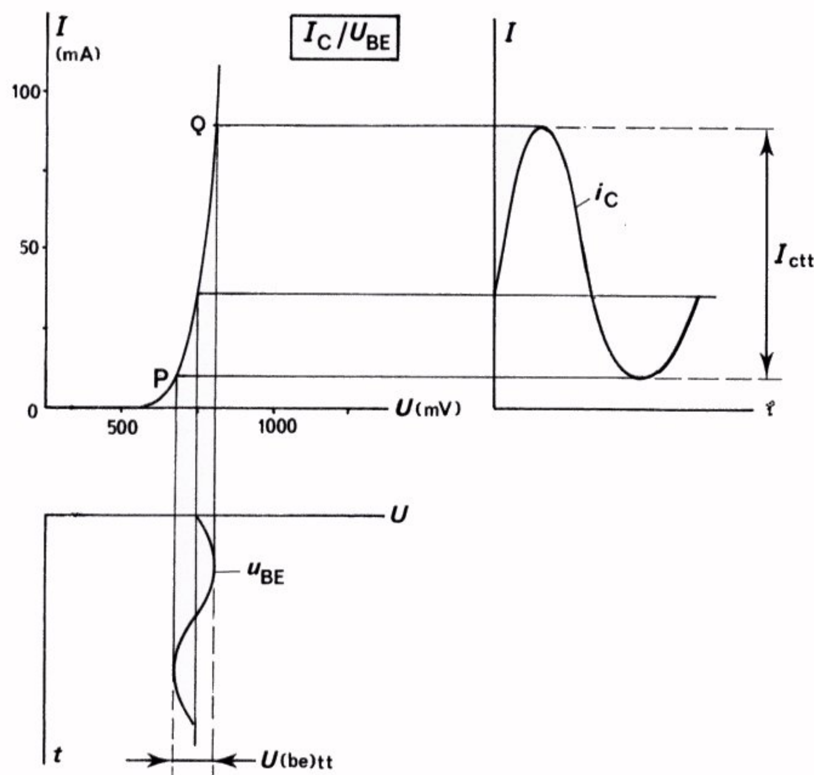
- Maak nu vervolgens weer R_B = 50 kΩ. Stel opnieuw $U_{(be)t}$ = 10 mV in en meet weer $U_{(ce)t}$, die nog steeds over R_C = 100 Ω staat.

$U_{(ce)t}$ = [mV]

- Hoe groot is I_{ct}? I_{ct} = [mA]
- Bereken ook voor dit geval de steilheid S. S = [mA/V]
- De steilheid S is nu [groter/kleiner] ; dit komt omdat:

GRAFISCHE BEPALING VAN DE STEILHEID.

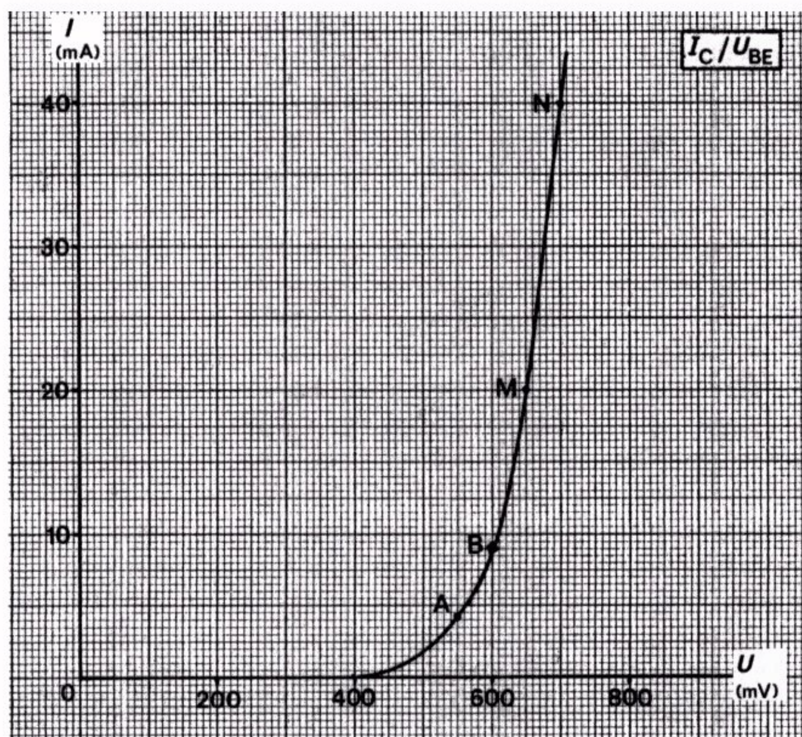
De steilheid *S* is een veel gebruikte grootheid. Verderop zullen we zien dat we voor de transistor in GES een aantal eenvoudige formules af kunnen leiden, waarin de grootheid *S* voorkomt. *S* wordt veelal door de fabrikant van de transistor opgegeven, maar het komt ook wel voor dat u de steilheid zelf moet bepalen.
Hoe gaan we dan te werk?



Stel dat we aan een transistor een wisselspanning u_{be} toevoeren. Met behulp van de overdrachtskarakteristiek zien we dat er een wisselstroom i_c ontstaat.
We gebruiken dat deel van de I_C - U_{BE} - karakteristiek dat tussen de punten P en Q ligt. We hebben dus te maken met de steilheid tussen P en Q.
Deze steilheid is:

$$S = \frac{I_{ctt}}{U_{bett}} = \frac{95 - 10}{800 - 700}\,\frac{\text{mA}}{\text{mV}} = \frac{85}{100} = 0{,}85\,\frac{\text{mA}}{\text{mV}} = 850\ \text{mA/V}.$$

Ga dit na!



- Dit is een I_C - U_{BE} - karakteristiek. Men noemt hem ook wel

  [ ] - karakteristiek

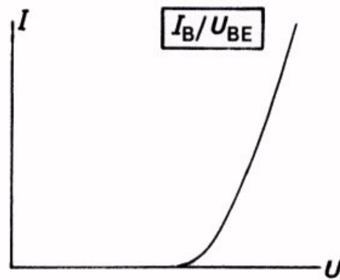
- Bepaal de steilheid tussen de punten A en B.

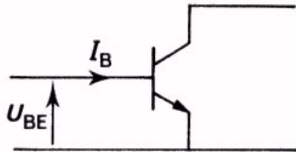
  S = [ ] mA/V

- Bepaal de steilheid ook tussen de punten M en N.

  S = [ ] mA/V

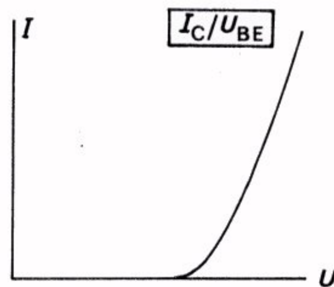
SAMENVATTING

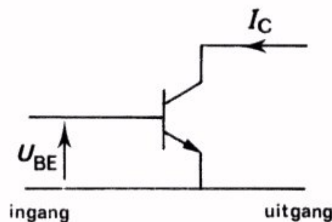




- Het verband tussen de *ingangs*stroom I_B en de *ingangs*spanning U_{BE} van een transistor legt men grafisch vast in de I_B - U_{BE} - *ingangskarakteristiek*

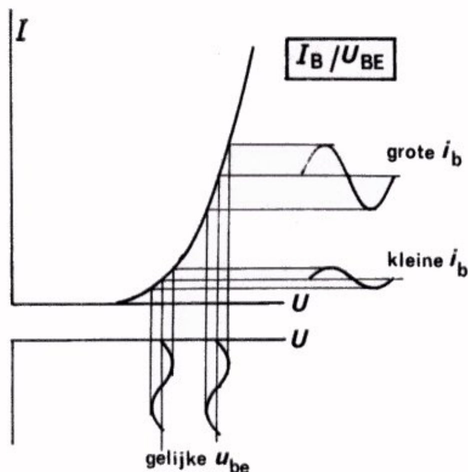
  Deze karakteristiek heeft de gekromde vorm van een diodekarakteristiek.





- Het verband tussen *uitgangs*stroom I_C en de *ingangs*spanning U_{BE} legt men grafisch vast in de I_C - U_{BE} - *overdrachtskarakteristiek.*

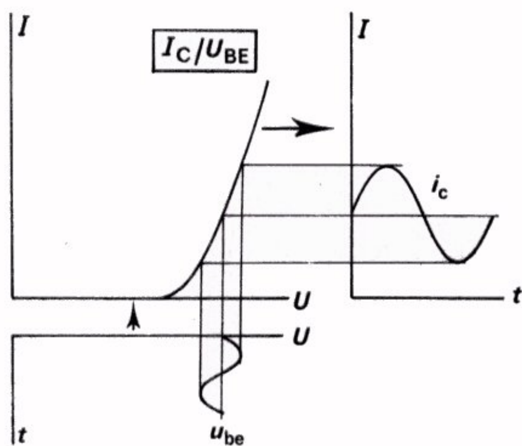
- De I_C - U_{BE} - karakteristiek ontstaat uit de I_B - U_{BE} - karakteristiek door de I_B-waarden met h_{FE} te vermenigvuldigen. De karakteristieken hebben ook daarom dezelfde vorm.



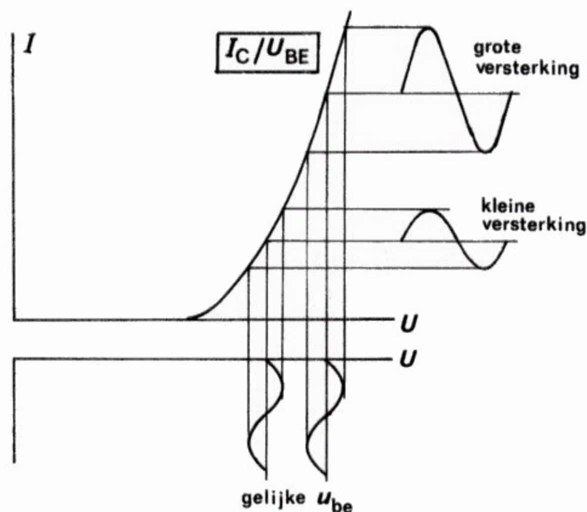
- De kromming van de I_B - U_{BE} - karakteristiek heeft tot gevolg dat de ingangswisselstroomweerstand

$$h_{ie} = \frac{u_{be}}{i_b}$$

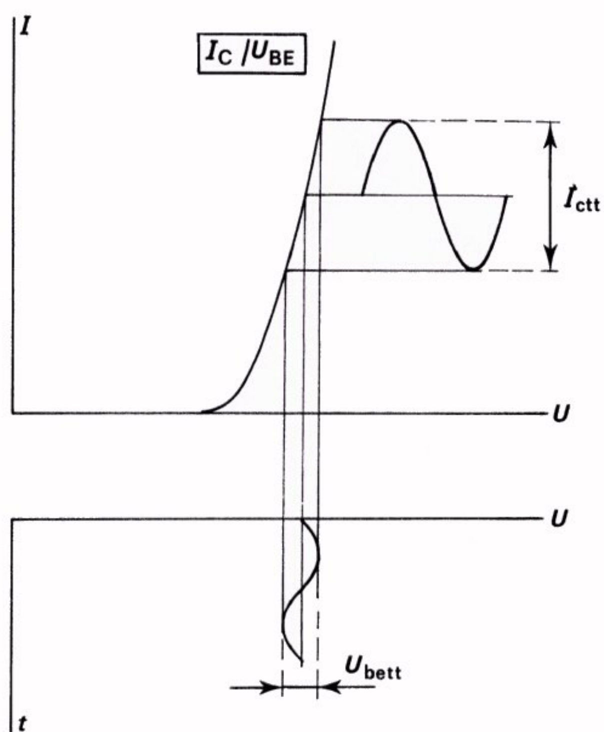
bij een grote instelstroom kleiner is dan bij een kleine instelstroom.



- De kromming van de I_C - U_{BE} - karakteristiek heeft tot gevolg dat bij het verwerken van *grote* ingangswisselspanningen een *vervorming* van de uitgangswisselstroom en spanning optreedt. Dit is een z.g. *niet-lineaire* vervorming.



- De kromming van de I_C - U_{BE} - karakteristiek heeft ook tot gevolg dat de versterking bij een grote instelstroom groter is dan die bij een kleine instelstroom.
Bij een grotere instelstroom heeft men namelijk een grotere steilheid.



De *steilheid* S is de verhouding van de uitgangswisselstroom tot de ingangswisselspanning:

$$S = \frac{I_{ctt}}{U_{bett}}$$

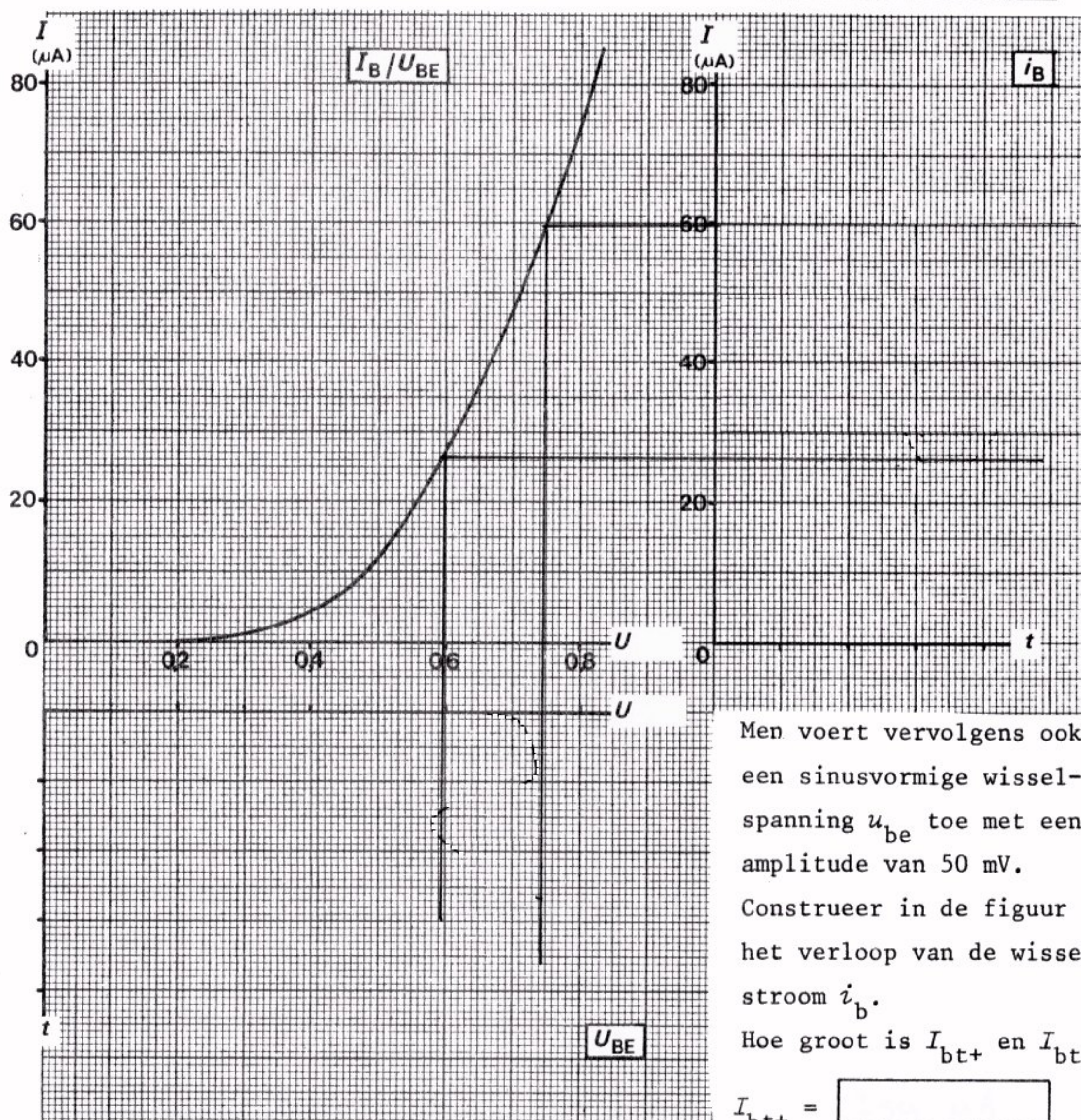
NAAM:

KLAS:

OEFENINGEN

1. Bij een bepaalde transistor behoort deze ingangskarakteristiek. De basisgelijkspanning U_{BE} = 0,7 V.
Hoe groot is I_B?

I_B = μA



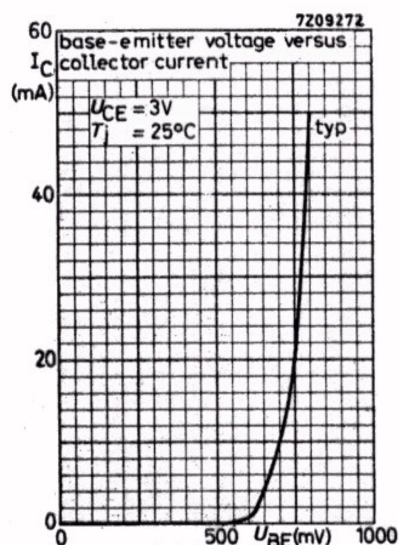
Men voert vervolgens ook een sinusvormige wisselspanning u_{be} toe met een amplitude van 50 mV.
Construeer in de figuur het verloop van de wisselstroom i_b.
Hoe groot is I_{bt+} en I_{bt-}

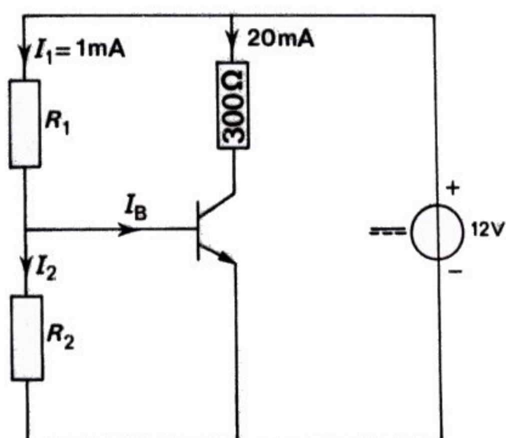
I_{bt+} =

I_{bt-} =

Als men I_B vervolgens verlaagt tot 20 µA dan wordt de ingangswisselstroomweerstand | groter/kleiner | , omdat:

2.





In de vereiste instelling met I_C = 20 mA is h_{FE} = 200.

Verder is de I_C - U_{BE} - karakteristiek gegeven.

Bepaal de waarden van:

U_{CE}, U_{BE}, I_B, R_1, I_2 en R_2.

U_{CE} =	V	U_{BE} =	mV
I_B =	mA	R_1 =	kΩ
I_2 =	mA	R_2 =	Ω

B 210

D E   U I T G A N G S K A R A K T E R I S T I E K E N

INLEIDING

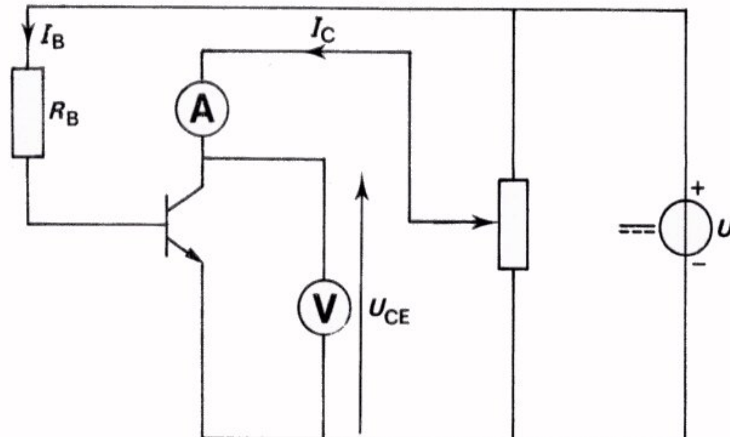
In de vorige les hebben we inzicht gekregen in het gedrag van de transistor aan de ingang. We hebben dit verkregen aan de hand van de I_B - U_{BE}-karakteristiek, de zogenaamde *ingangskarakteristiek*

Het ingangsgedrag is van invloed op het signaal aan de uitgang van de transistor. Om dit direct duidelijk te maken is ook de I_C - U_{BE} - karakteristiek ter sprake gekomen. Deze noemden we de *overdrachtskarakteristiek.*

In deze les gaan we de I_C - U_{CE} - karakteristiek bespreken. Deze legt een verband tussen stroom en spanning aan de uitgang van de transistor en wordt daarom de *uitgangskarakteristiek* genoemd.

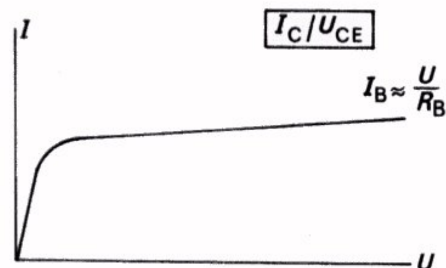
DE I_C - U_{CE} - KARAKTERISTIEKEN

Bij een transistor houden we I_B constant. Nu gaan we het verband tussen I_C en U_{CE} onderzoeken. Dit verband levert een I_C - U_{CE} - of uitgangskarakteristiek. Deze karakteristiek kan globaal worden gemeten met volgende schakeling:



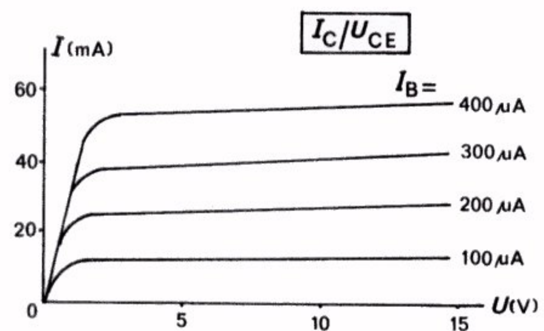
U_{CE} is te variëren met behulp van de potentiometer. De stroom- en spanningsmeter geven respectievelijk I_C en U_{CE} aan. In deze schakeling is U_B vrijwel constant en gelijk aan $I_B \approx \frac{U}{R_B}$.

Meet men de bedoelde karakteristiek, dan verkrijgt men nevenstaand resultaat.

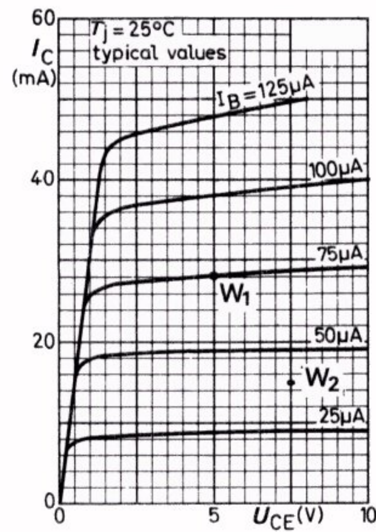


Geeft men R_B achtereenvolgens verschillende waarden, dan vindt men andere karakteristieken die voor andere waarden van I_B gelden.

Voor een transistor komt men zodoende tot een *bundel* I_C - U_{CE} - *uitgangskarakteristieken* zoals in nevenstaande figuur.



OEFENING



Hier ziet u een bundel uitgangskarakteristieken van een transistor. Ga aan de hand van deze grafische voorstelling na hoe groot de gelijkstroom I_C , I_B en de gelijkspanning U_{CE} is bij de aangegeven punten W_1 en W_2.

Bij punt W_1: I_C = ☐

I_B = ☐

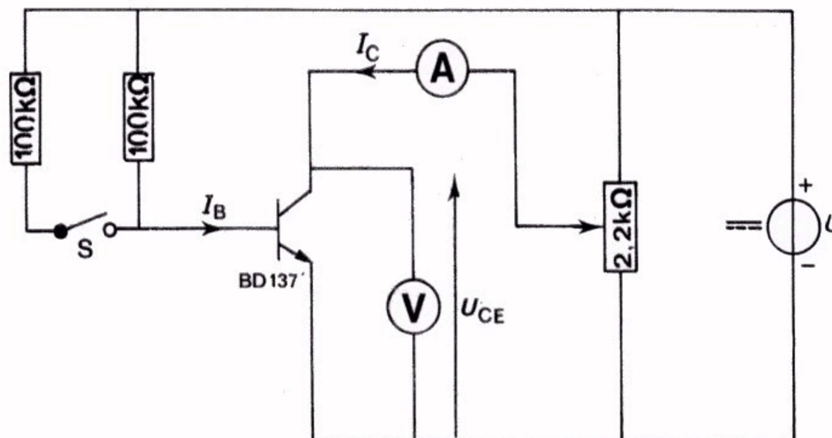
U_{CE} = ☐

Bij punt W_2: I_C = ☐

I_B = ☐

U_{CE} = ☐

OPDRACHT: METEN VAN DE I_C - U_{CE} - KARAKTERISTIEK



- Bouw deze schakeling op het paneel. Laat S open.
- Stel de voedingsbron in op 20 V.
- I_B is nu ongeveer gelijk aan: [μA] (berekenen)
- Stel met behulp van de potentiometer in op de waarden U_{CE} zoals vermeld in de eerste tabel op volgend blad. Lees telkens de waarde van I_C af en noteer deze in de tabel. Voer deze meting liefst snel uit opdat de transistor niet te lang verhit wordt.
- Zet parallel aan de weerstand R_B = 100 kΩ nog een weerstand van 100 kΩ door S te sluiten.

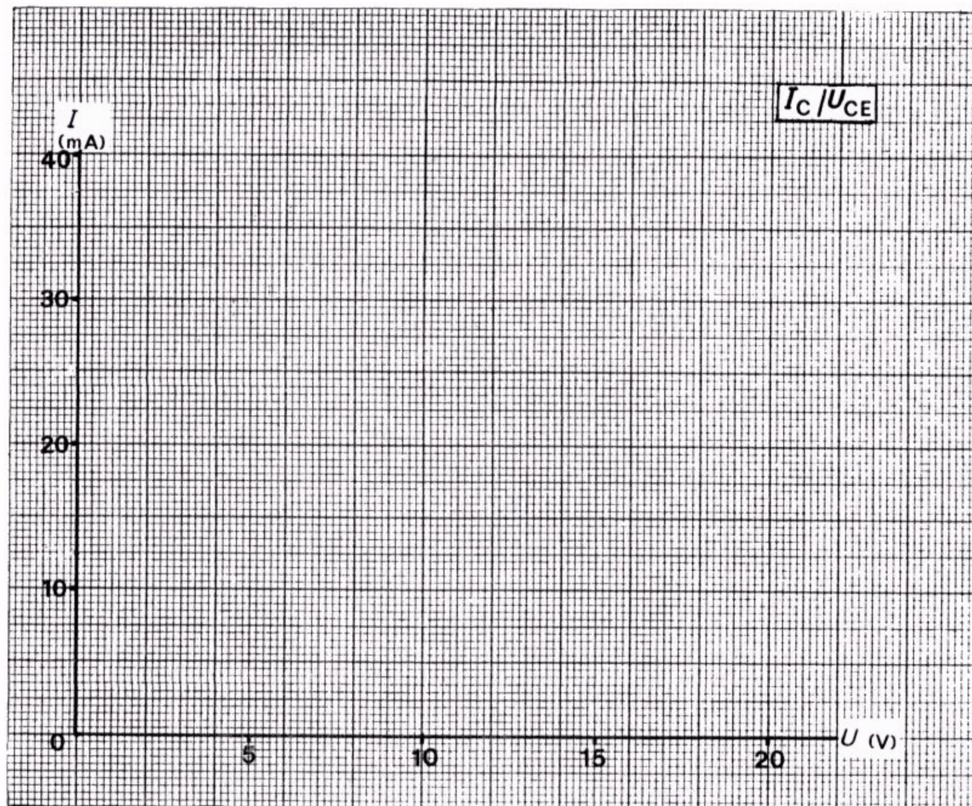
  Nu wordt I_B: [μA] (berekenen)
- Meet nu de waarden van I_C en U_{CE} opnieuw.
  Voer de meting weer snel uit opdat de transistor niet te heet wordt.
  Vul de gevonden waarden van I_C in de tweede tabel in.
- Teken de karakteristieken voor de twee waarden van I_B in de grafiek op volgend blad.
- Schakel de voedingsspanning uit.

I_B = μA

U_{CE} (V)	I_C (mA)
0	
2	
3	
5	
20	

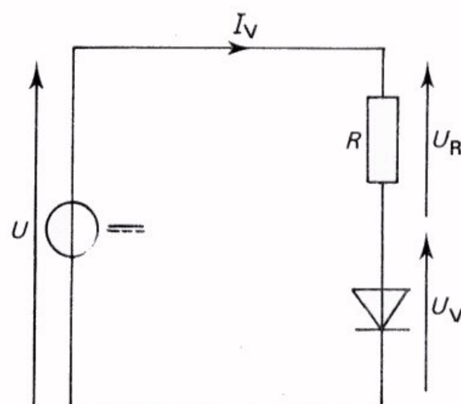
I_B = μA

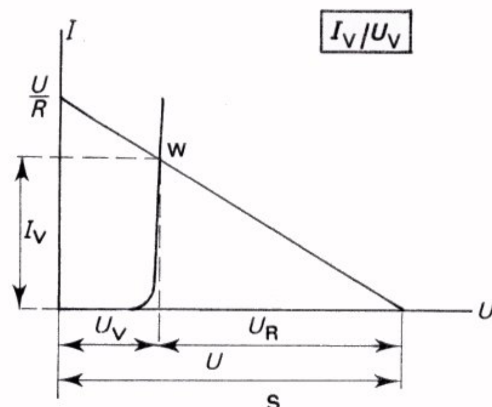
U_{CE} (V)	I_C (mA)
0	
2	
3	
5	
20	



DE BELASTINGLIJN

Bij de behandeling van de diode is de belastinglijn ter sprake gekomen. Heel in het kort herhalen we nog even het daar behandelde.

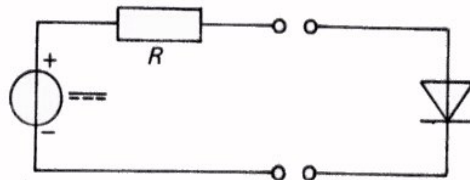




Sluit men een weerstand R en een diode in serie aan op een spanningsbron, dan is de instelling als volgt te bepalen:

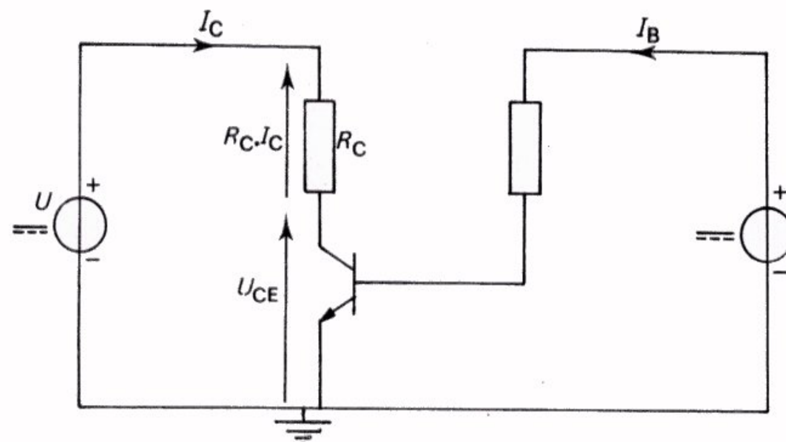
- Men tekent in een grafiek de statische karakteristiek van de desbetreffende diode.
- Daarna tekent men in hetzelfde assenstelsel de belastinglijn.
- De belastinglijn en de statische diodekarakteristiek snijden elkaar in het werkpunt W.
- Door dit punt W wordt de instelling geheel vastgelegd.

Bij de behandeling van de diode in les B203 zijn we uitgegaan van een serieschakeling van een spanningsbron en een weerstand.



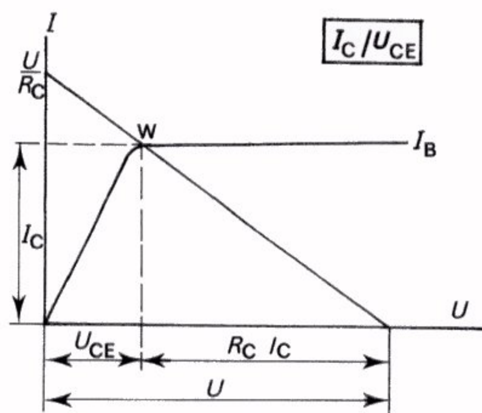
Deze schakeling werd dan vervolgens "belast" met een diode.
Lees dat verhaal zonodig nog eens door.

In les B208 hebben we in de collectorleiding een weerstand R_C aangebracht om ook spanning te kunnen versterken. We gaan nu de situatie zó bekijken dat de voeding met de serieweerstand R_C worden belast met de transistor. We doen dus alsof R_C bij de voedingsbron hoort.



Hier is deze toestand getekend. De belasting van de voedingsbron in serie met R_C wordt gevormd door de transistor.

De instelling van de transistor kan men nu op soortgelijke manier als bij de diode bepalen.

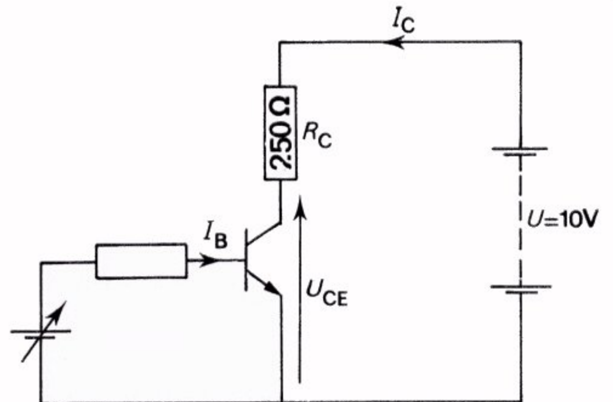


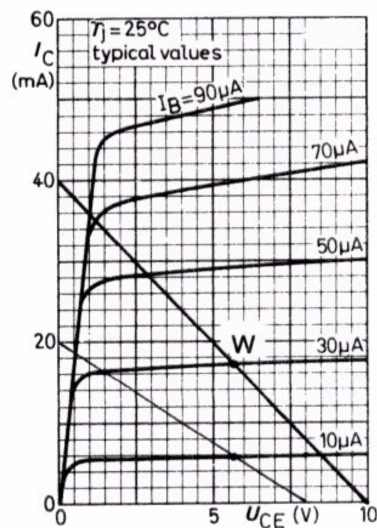
Bij de I_C - U_{CE} - karakteristiek voor een bepaalde I_B tekent men de belastinglijn.
Het snijpunt W van deze twee lijnen legt de instelling vast.
De grootte van de transistorstroom I_C, de transistorspanning U_{CE} en de gelijkspanning $R_C.I_C$ over R_C zijn nu bekend.

Het nut van de uitgangskarakteristieken wordt zo reeds duidelijk. Met behulp van deze karakteristieken en de belastinglijn kan men de gelijkstroominstelling van de transistor bepalen.

VOORBEELD

Hier is een schakeling gegeven waarin een transistor is opgenomen.
Hieronder vindt u de uitgangskarakteristieken van de transistor.





In deze bundel karakteristieken is de belastinglijn getekend voor dit geval. De rechte lijn loopt van het punt U = 10 V naar het punt $I = \frac{U}{R_C} = \frac{10}{250}$ A = 40 mA op de verticale as.

Als we aan de transistor een basisstroom I_B = 30 µA toevoeren, dan zien we dat het instelpunt W wordt.

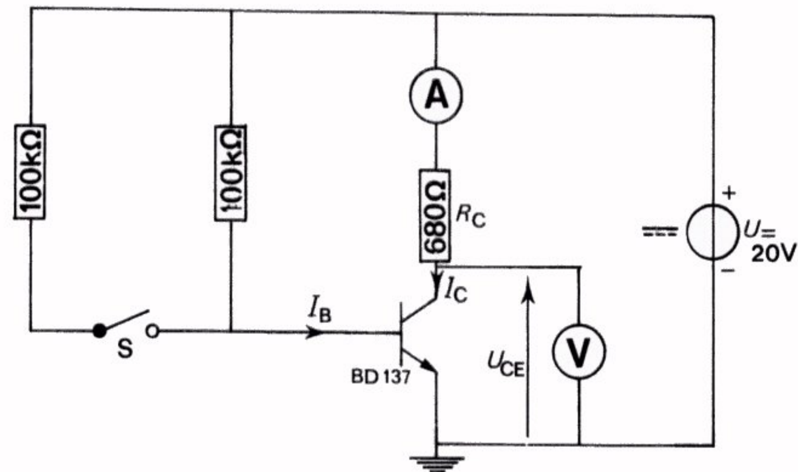
Hoe groot is nu I_C? I_C = [ ]

Hoe groot is U_{CE}? U_{CE} = [ ]

Bepaal nu zelf de instelling als R_C = 400 Ω, U = 8 V en I_B = 10 µA.

I_C = [ ] , U_{CE} = [ ]

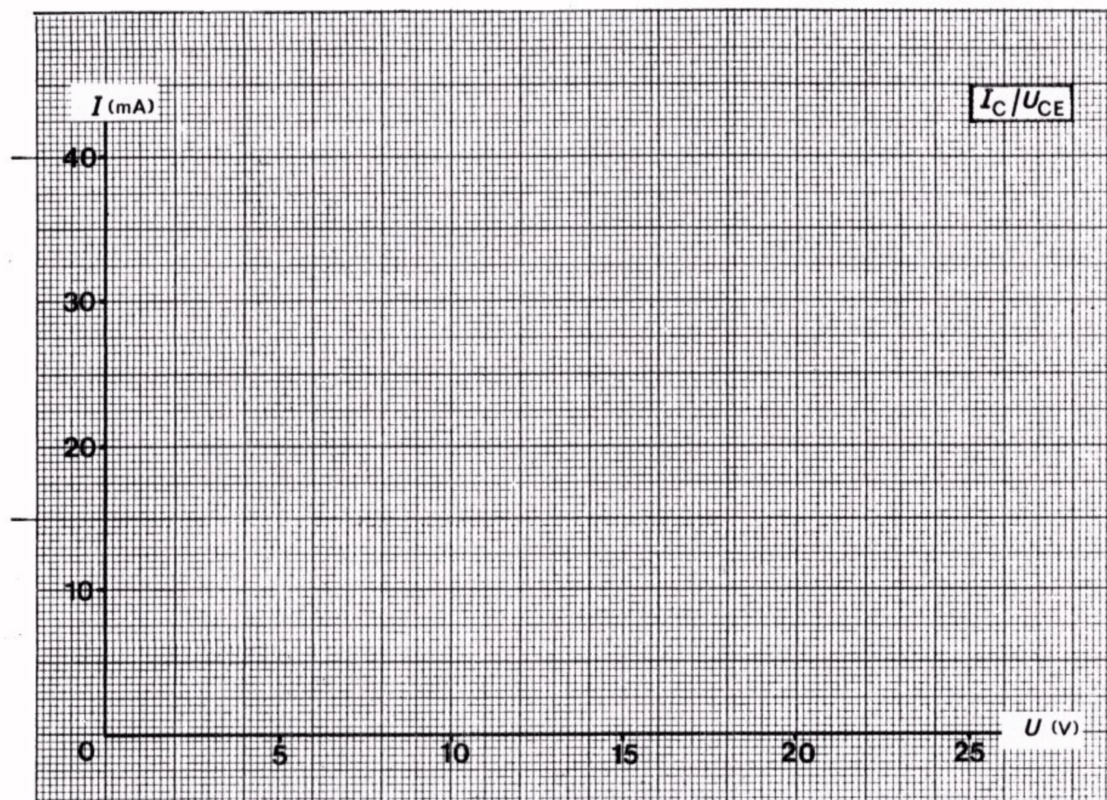
OPDRACHT: BEPALING VAN HET INSTELPUNT



- Verander de schakeling op uw paneel in die volgens bovenstaand schema.
- Teken de karakteristieken van blad B210.5 zorgvuldig over op volgend blad.
- Teken in deze grafiek de belastinglijn voor het geval van de schakeling op uw paneel; U = 20 V en R_c = 680 Ω.
- Bepaal uit de grafiek I_C en U_{CE} voor I_B = 200 µA en voor I_B = 400 µA. Noteer de antwoorden in volgende tabel.

I_B (µA)	I_C (mA)	U_{CE} (V)
200		
400		

- Ga nu door meting na of de grafisch bepaalde waarden inderdaad ongeveer kloppen.
  Voer de metingen snel uit, anders wordt de transistor te lang verwarmd.



OEFENING

Bepaal de instelling voor bovenstaande uitgangskarakteristieken bij een voedingsspanning van 15 V en een collectorweerstand van 330 Ω.

Als I_B = 400 µA

I_C =

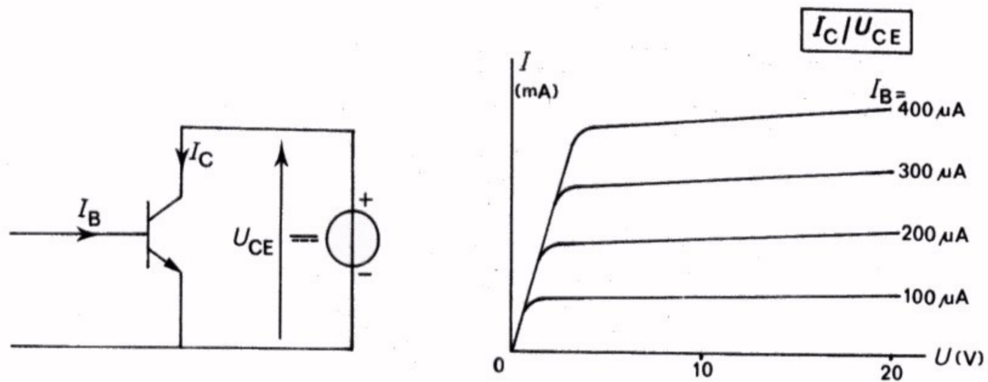
U_{CE} =

Als I_B = 200 µA

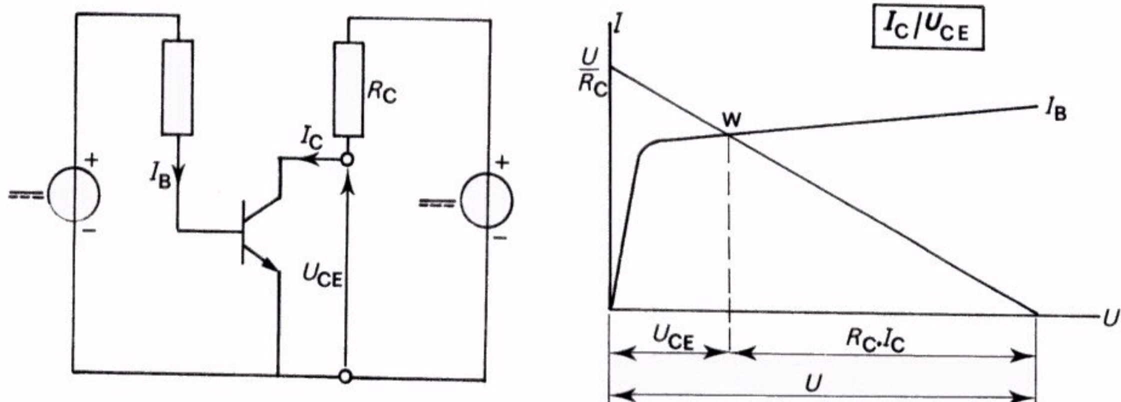
I_C =

U_{CE} =

SAMENVATTING



Het verband tussen *uitgangs*stroom I_C en *uitgangs*spanning U_{CE} wordt gegeven door de I_C - U_{CE} - of *uitgangskarakteristieken-bundel.*
Elke karakteristiek legt voor één I_B-waarde vast hoe groot I_C is bij verschillende waarden van U_{CE}.



De uitgangskarakteristieken zijn o.a. van nut om de instelstroom I_C en de instelspanning U_{CE} van een transistor in een schakeling te kunnen bepalen. Door het tekenen van een belastinglijn vindt men het instelpunt W. De belastinglijn loopt van het punt $U_{CE} = U$ op de horizontale as naar het punt $I_C = U/R_C$ op de verticale as.

NAAM: [ ] KLAS: [ ]

OEFENINGEN

1. De karakterstiek die een verband legt tussen de basisgelijkstroom en de gelijkspanning U_{BE} heet:

   de [ ] karakteristiek.

   De overdrachtskarakteristiek legt een verband tussen de grootheden:

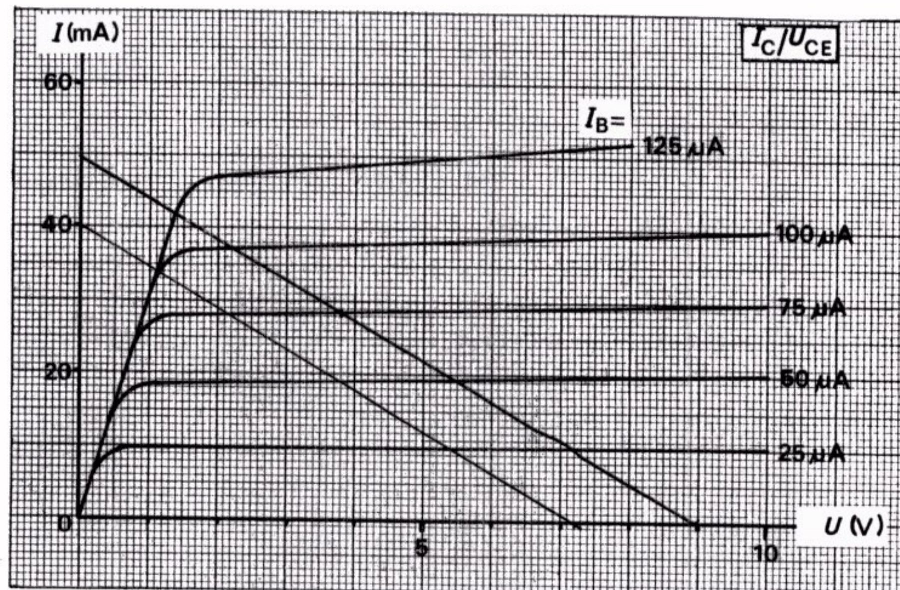
   [ ] en [ ]

   In deze les hebben we kennis gemaakt met de uitgangskarakteristiek. Deze legt een verband tussen de grootheden:

   [ ] en [ ]

   Voor iedere gelijkstroom: [ ] geldt een andere uitgangskarakteristiek

2. Teken in volgende bundel uitgangskarakteristieken de belastinglijn voor een voedingsspanning van 9 V en een collectorweerstand van 180 Ω.



- Bepaal aan de hand van de grafiek de instelling voor een basisstroom van 75 µA.

I_C =	
U_{CE} =	

- Hoe is de instelling ongeveer bij I_B = 90 µA?

I_C ≈	
U_{CE} ≈	

- Als de voedingsspanning daalt naar 7,2 V, hoe wordt dan de instelling bij I_B = 50 µA?

I_C =	
U_{CE} =	

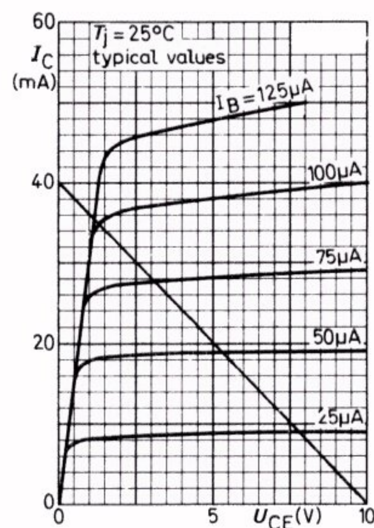
B 211

HET VERWERKEN VAN WISSELSTROOM

DOOR EEN GES

INLEIDING

In de vorige les hebben we kennis gemaakt met de uitgangskarakteristiek van een transistor. Hieronder geven we nogmaals een bundel uitgangskarakteristieken zoals die voor een transistor door de fabrikant worden opgegeven.



De grafiek geeft een verband tussen stroom en spanning aan de uitgang van de transistor. Dit verband is afhankelijk van de basisstroom I_B, vandaar dat voor een aantal waarden van I_B een karakteristiek wordt opgegeven.

De instelling kan nu worden bepaald door middel van de belastinglijn. In bovenstaande figuur is een belastinglijn getekend voor een voedingsspanning van 10 V en een collectorweerstand R_c = 250 Ω. Bij I_B = 75 μA geldt voor de instelling:

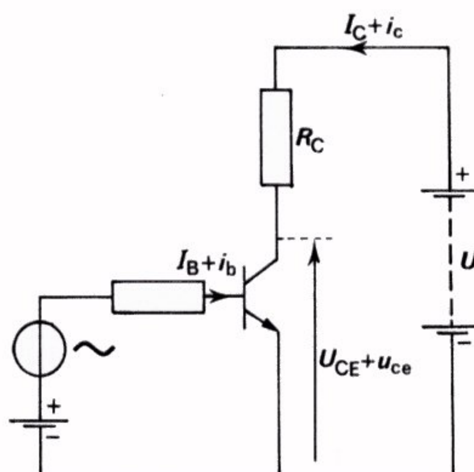
$$I_C \approx 28 \text{ mA}$$

$$U_{CE} \approx 3 \text{ V}$$

U begrijpt dit volkomen? Zo niet, vraag uw leraar om nadere uitleg.

HET VERWERKEN VAN WISSELSTROOM

In de vorige les hebben we ons bezig gehouden met het bepalen van de instelling van de transistor. We gebruikten de uitgangskarakteristieken om iets te weten te komen over gelijkstromen en -spanningen. Ook het wisselstroomgedrag van de transistor kunnen we aan de hand van de uitgangskarakteristieken duidelijk maken.

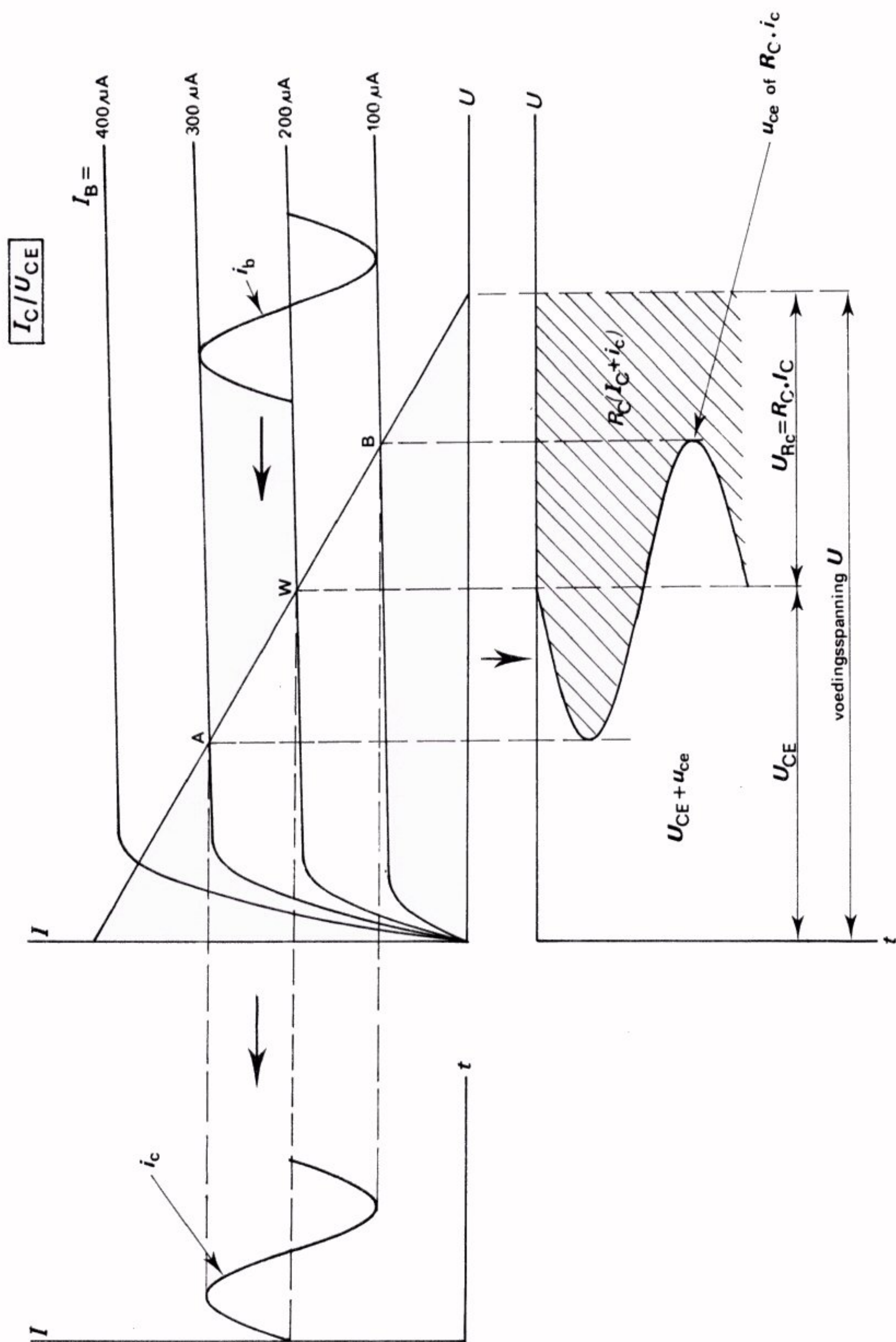


Hier voeren we aan een transistor, behalve een gelijkstroom I_B, ook een wisselstroom i_b toe. Over R_C ontstaat ook een wisselspanning $R_C \cdot i_c$. Over de transistor ontstaat dan de spanning:

$$U - R_C\ (I_C + i_c) \quad \text{of} \quad U_{CE} + u_{ce}$$

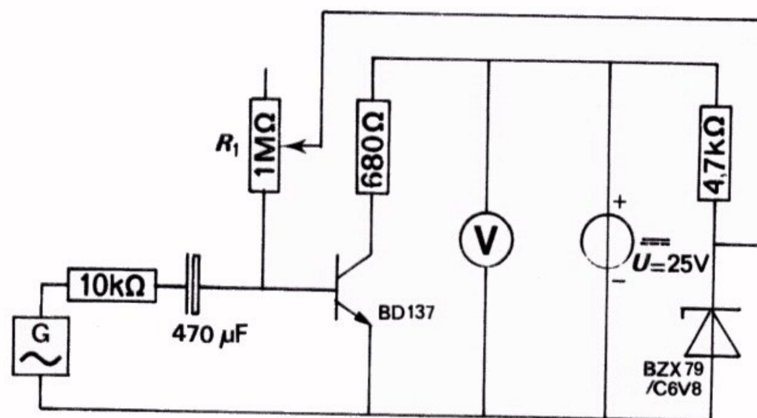
Dit alles kunnen we duidelijk zien aan de hand van de uitgangskarakteristieken en de belastinglijn op het volgend blad.
De transistor is ingesteld in W. Voeren we nu ook een wisselstroom i_b toe, dan beweegt de transistorinstelling zich tussen de karakteristieken I_B = 100 µA en 300 µA. De instelling tussen de punten A en B beweegt zich dan langs de belastinglijn. Door A, W en B "naar links over te halen" vinden we hoe de collectorwisselstroom i_c verloopt.
Door A, W en B "naar beneden over te halen" vinden we het verloop van de wisselspanning u_{ce} over de transistor.

Merk op, dat u_{ce} in tegenfase is met i_b.



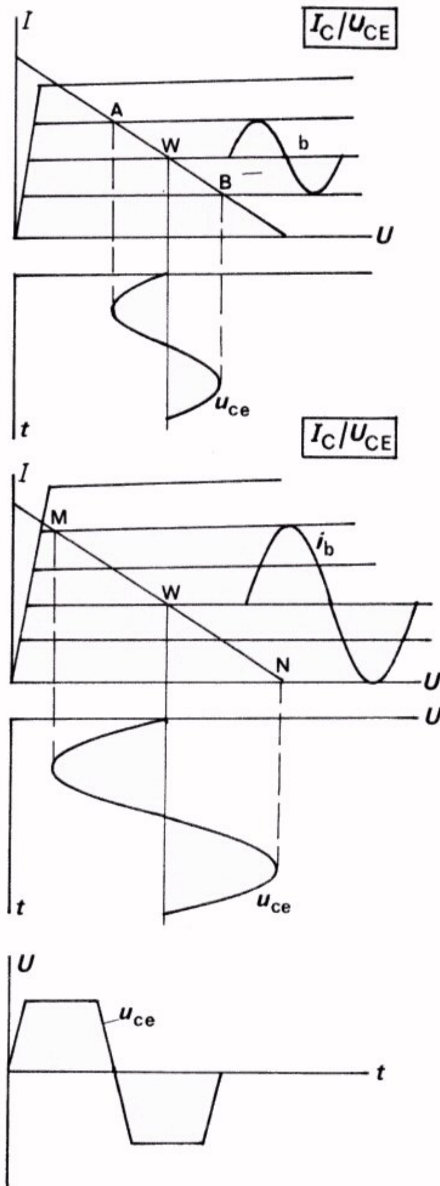
I_C / U_{CE}
$I_B =$
400 μA
300 μA
200 μA
100 μA
i_b
i_c
I
U
t
A
W
B
$R_C(I_C + i_c)$
u_{ce} of $R_C \cdot i_c$
$U_{R_C} = R_C \cdot I_C$
$U_{CE} + u_{ce}$
U_{CE}
voedingsspanning U

OPDRACHT: HET VERWERKEN VAN EEN WISSELSTROOM DOOR EEN GES.



- Bouw deze schakeling op uw paneel.
- Stel U in op 25 V.
- Regel de instelling van de transistor met behulp van R_1 zodanig, dat $U_{CE} = \frac{1}{2}U$. De gelijkstroominstelling is regelbaar door middel van de potentiometer van 1 MΩ.
- Voer vanaf de 600 Ω-uitgang van de LF-generator een wisselspanning u van ca. 0,5 V en een frequentie van 1 kHz toe.
- Maak de uitgangswisselspanning u_{ce} zichtbaar op het scherm van de oscilloscoop. Trigger de oscilloscoop daarbij extern met de spanning op de 15 Ω-uitgang van de generator.
- Maak daarna de aan de GES toegevoerde wisselspanning u zichtbaar. Blijf de oscilloscoop triggeren.
- U kunt nu constateren dat de GES de fase van de wisselspanning 180^0 verandert.
- Schakel de voedingsspanning uit.
- Breek de schakeling nog niet af.

HET VERWERKEN VAN EEN TE GROOT WISSELSTROOMSIGNAAL



Hiernaast is nog eens met de uitgangskarakteristieken en de belastinglijn getekend hoe de ingangswisselstroom i_b wordt verwerkt tot een uitgangswisselspanning u_{ce}.

We kunnen ons nu afvragen wat er gebeurt als we i_b nog veel groter maken.

Bij het verwerken van i_b schuift het instelpunt tussen A en B langs de belastinglijn heen en weer.
Als i_b toeneemt, schuift het instelpunt op den duur tussen M en N, de uiteinden van de belastinglijn, heen en weer. Dan treedt er een maximale niet vervormde u_{ce} op.

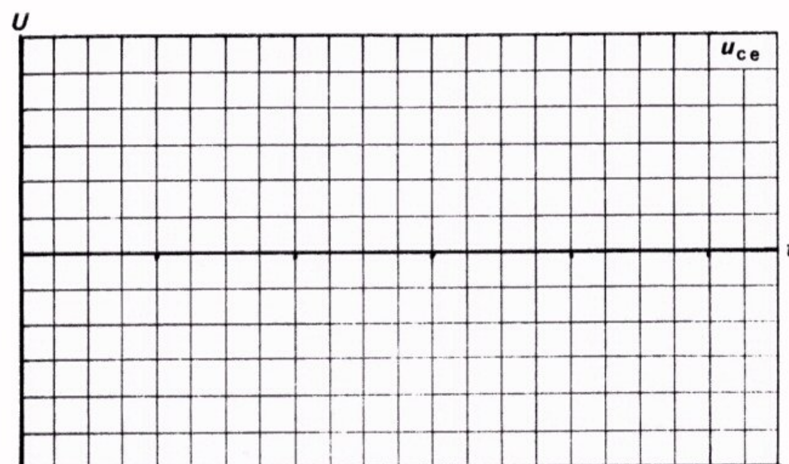
Laten we i_b nóg meer toenemen, dan kan het instelpunt *niet* voorbij de eindpunten M en N van de belastinglijn komen.
Hierdoor worden de toppen van u_{ce} afgeplat, terwijl de top tot top-waarde niet meer verandert. Er treedt als het ware begrenzing op.
Met een transistor kan men zo ook een signaal *begrenzen.*

Het instelpunt kan niet voorbij M komen omdat I_C niet groter kan worden dan ongeveer U/R_C.

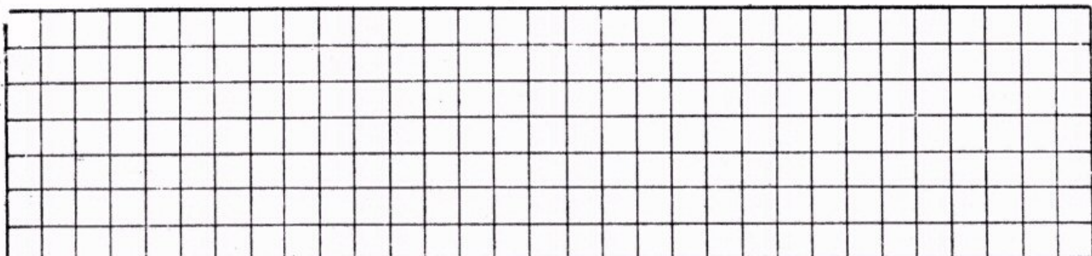
Het instelpunt kan niet voorbij N komen omdat I_C niet negatief kan worden.

OPDRACHT: VERWERKING VAN EEN GROOT SIGNAAL.

- Gebruik de schakeling op uw paneel.
- Controleer of U_1 nog ingesteld is op 25 V.
- Zet de stappenschakelaar van de generator op "1 x V_o" en maak *u* maximaal. We voeren nu dus een veel groter signaal toe dan bij de vorige opdracht.
- Sluit de oscilloscoop aan op de uitgang van de transistor.
- Teken hieronder de wisselspanning die u op het scherm ziet.

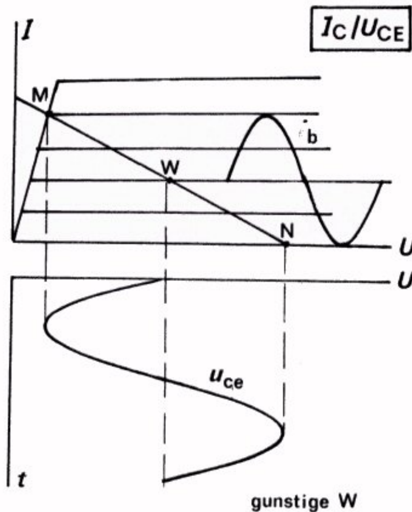


- U ziet nu aan beide toppen begrenzing optreden.
- Regel de wisselspanning *u* nu omlaag zodat aan beide kanten net geen begrenzing meer optreedt.
- Wat gebeurt er als men de voedingsspanning *U* daarna vermindert?



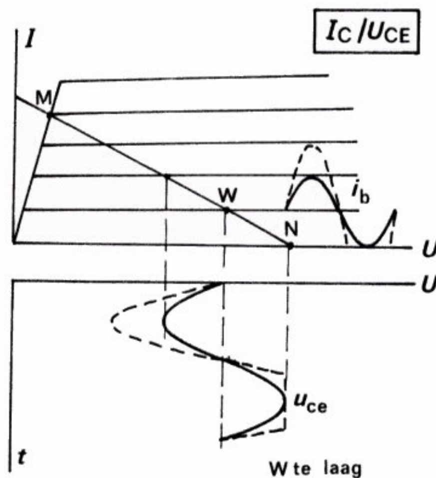
- Zet *U* daarna weer op 25 V.
- Breek de schakeling niet af.

HET JUISTE WERKPUNT



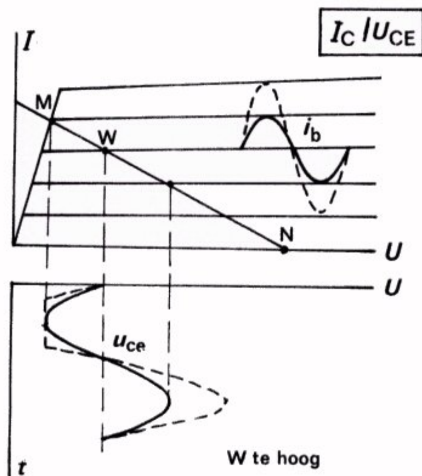
gunstige W

Tot nu toe hebben we aangenomen dat het werkpunt W *in het midden* van de belastinglijn ligt. In dit geval treedt de afplatting van het signaal bij toenemende i_b aan beide zijden gelijktijdig op. Dit is de gunstigste instelling als men een wisselspanning onvervormd wil kunnen versterken. Immers, dan kan men een zo groot mogelijke u_{ce} verkrijgen die nog onvervormd is.



W te laag

Kiest men W te laag, dan begint de afplatting van het signaal bij toenemende i_b eerst aan de N-kant en pas daarna aan de M-kant. De nog net toelaatbare i_b en de dan optredende u_{ce} zijn met getrokken lijnen getekend.
De te grote i_b en de dan optredende u_{ce} zijn met streeplijnen getekend.



W te hoog

Kiest men W te hoog, dan treedt het omgekeerde op. Eerst afplatting aan de M-kant en bij nog grotere i_b aan de N-kant. Ook nu zijn de grote i_b en de dan optredende u_{ce} met streeplijnen weergegeven.
In volgende opdracht gaan we deze verschijnselen bekijken.

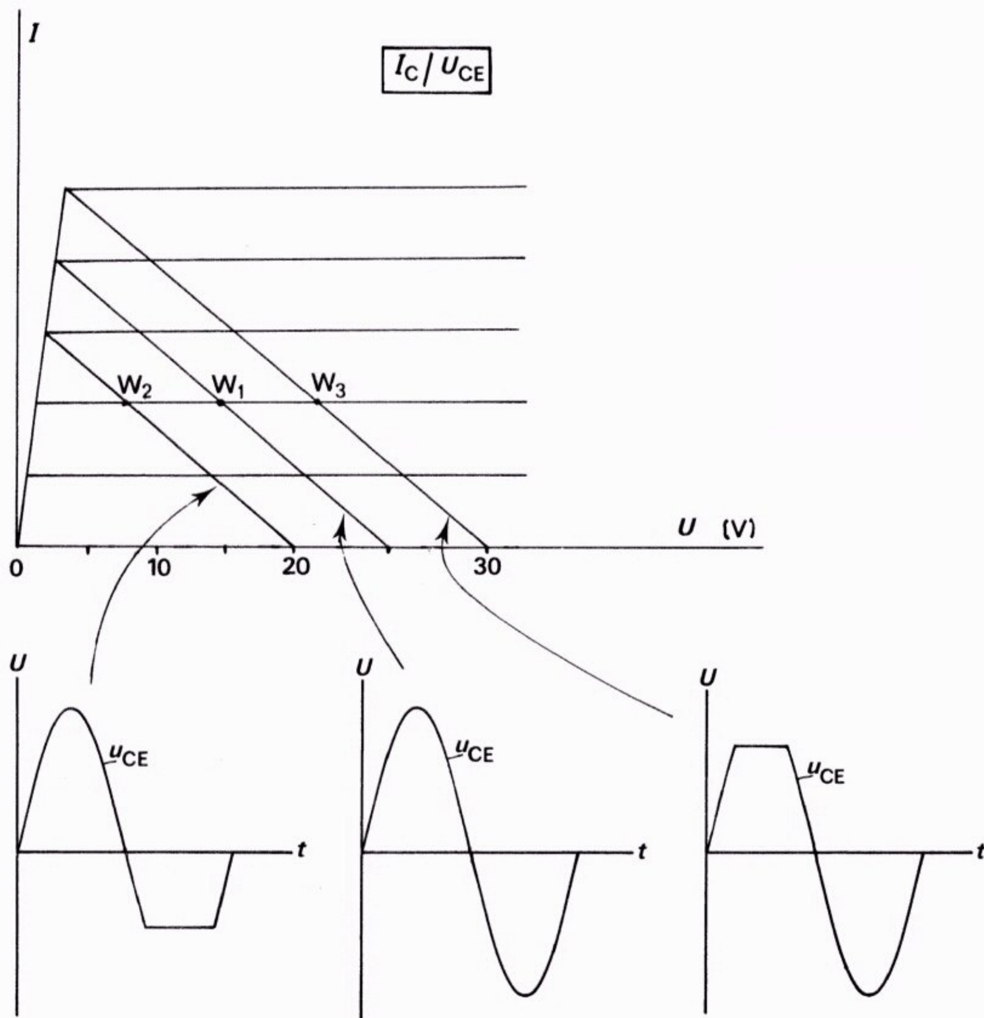
OPDRACHT: HET VERWERKEN VAN EEN GROTE WISSELSTROOM BIJ VERSCHILLENDE INSTELLINGEN.

- Gebruik de schakeling die zich nog op uw paneel bevindt.
- U_1 is nog steeds zo ingesteld, dat de begrenzing aan beide kanten tegelijkertijd optreedt.
- Laat de generatorspanning langzaam toenemen en bekijk op het scherm van de oscilloscoop of dit inderdaad nog het geval is. Het werkpunt ligt dan blijkbaar in het midden van de belastinglijn. Zie punt W_1 in de grafiek op volgend blad.
- Breng de generator terug naar 0 V en stel U in op 20 V.
- Laat de wisselspanning opnieuw langzaam toenemen en bekijk u_{ce} op het scherm. De afplatting treedt nu eerst bij de onderste top op en pas later bij de bovenste. Het werkpunt W ligt nu bij een te lage collectorspanning. Zie punt W_2 in de grafiek op volgend blad.
- Breng de generatorspanning terug naar 0 V en stel U in op 30 V.
- Laat de wisselspanning weer langzaam toenemen en bekijk u_{ce}. De afplatting begint bij de bovenste top. Het werkpunt ligt bij een te hoge collectorspanning. Zie punt W_3 in de grafiek op volgend blad.
- Vraag: hoe komt het dat als de afplatting bijvoorbeeld *bovenaan* de belastinglijn optreedt (bij lage U), het sinusbeeld op het oscilloscoopscherm *onderaan* een afplatting vertoont?

- Breek de schakeling af.

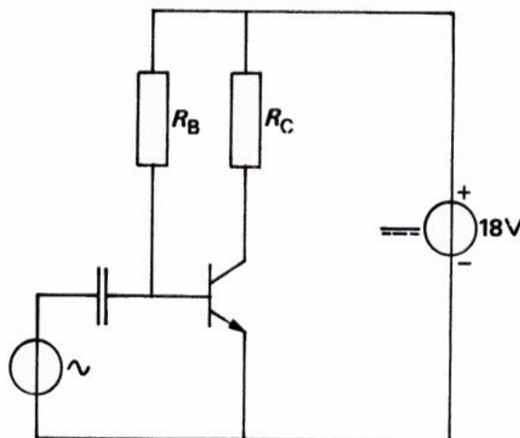
Opmerking:

In geval van W_1 en W_2 veronderstellen we even grote i_b's toe te voeren.
In geval van W_3 is de toegevoerde i_b groter verondersteld.
Ga dit zelf na.



OEFENING

Hier ziet u een transistor in een gemeenschappelijke emitterschakeling. Op het volgend blad treft u de uitgangskarakteristieken aan voor I_B = 200 µA en voor I_B = 400 µA.

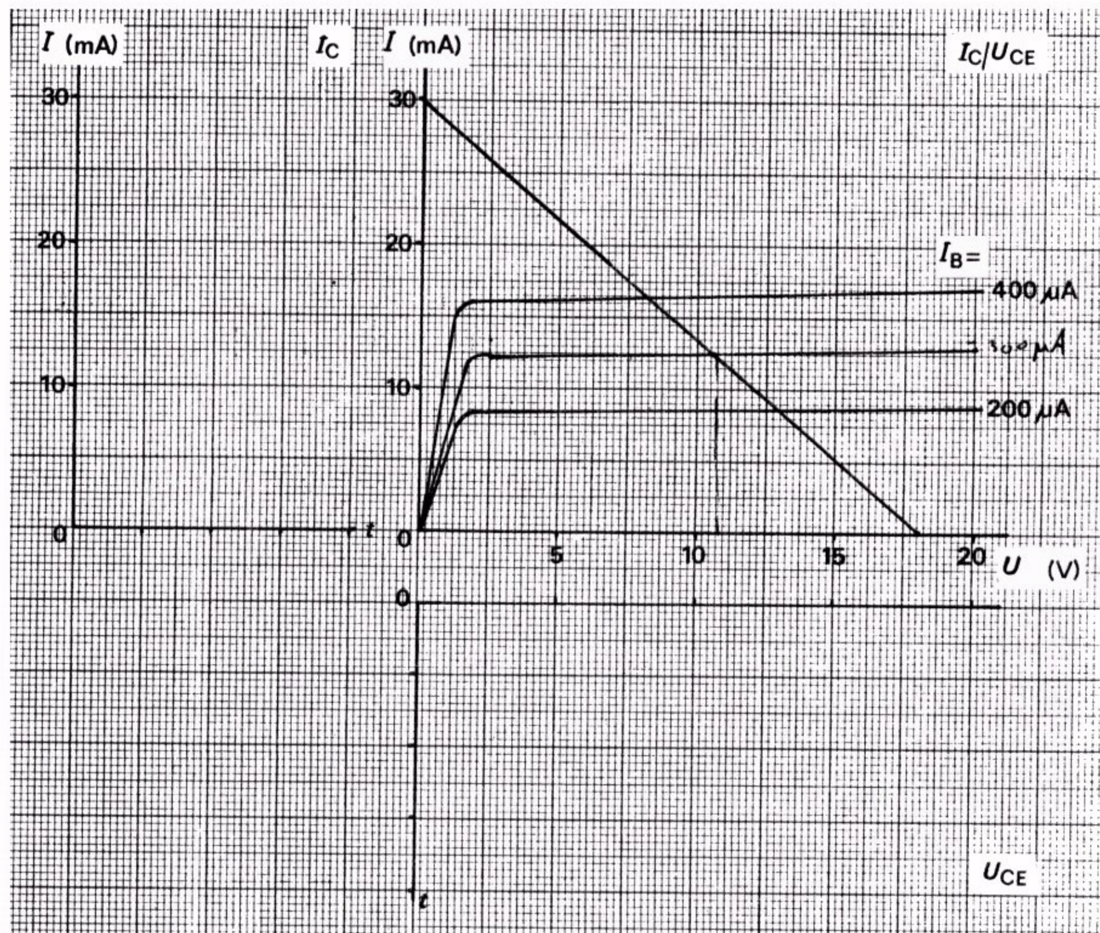


- Schets zelf de karakteristiek voor $I_B \approx$ 300 µA.
- Teken de belastinglijn voor het geval dat U = 18 V en R_C = 600 Ω.
- Hoe groot dient R_B ongeveer te zijn opdat $I_B \approx$ 300 µA?

$R_B \approx$ ______

- Veronderstel dat er een i_b wordt toegevoerd met een amplitude van 100 µA.

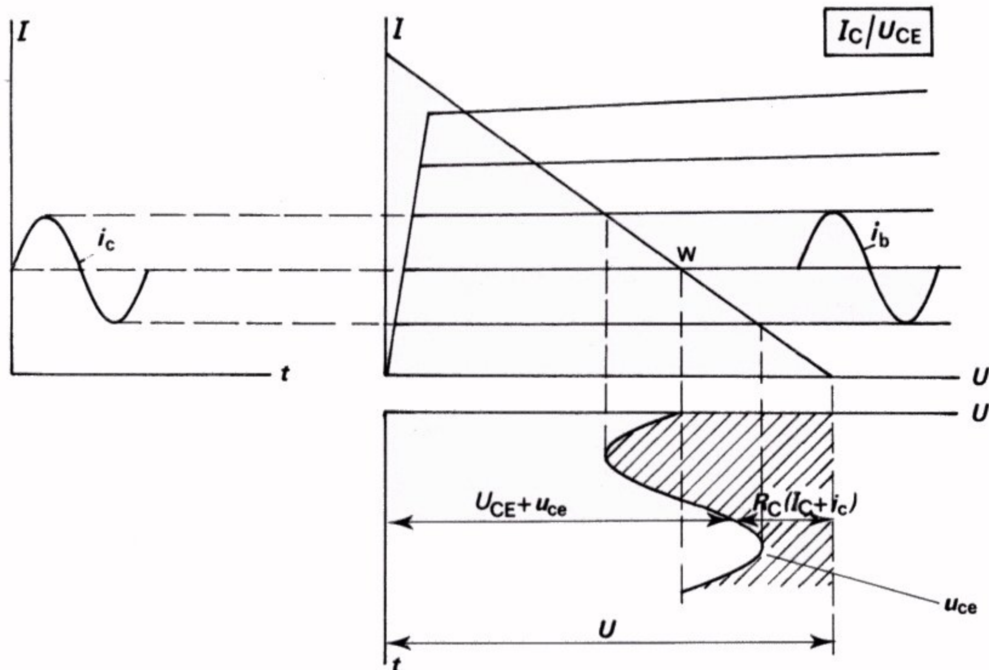
  Teken voor dat geval het verloop van I_C en U_{CE} bij de karakteristieken.



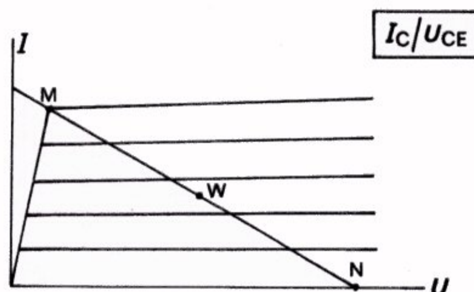
I (mA)
I_C
30
20
10
0
t
I (mA)
I_C/U_{CE}
30
20
10
0
$I_B =$
400 μA
300 μA
200 μA
5
10
15
20
U (V)
0
t
U_{CE}

SAMENVATTING

- De uitgangskarakteristieken tezamen met de belastinglijn kunnen verduidelijken hoe een wisselspanning door een GES wordt verwerkt.



- Als U_{BE} toeneemt, neemt I_B toe, neemt I_C toe en neemt U_{CE} af: u_{ce} en u_{be} zijn in tegenfase. Een GES draait de fase 180^0.

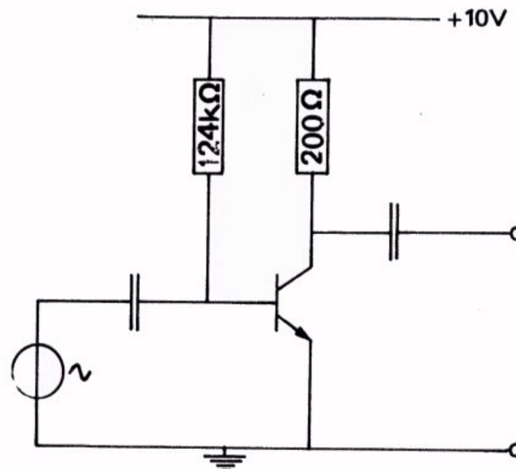


Om een zo groot mogelijke uitgangswisselspanning onvervormd af te kunnen nemen, moet men werkpunt W midden tussen M en N in kiezen.

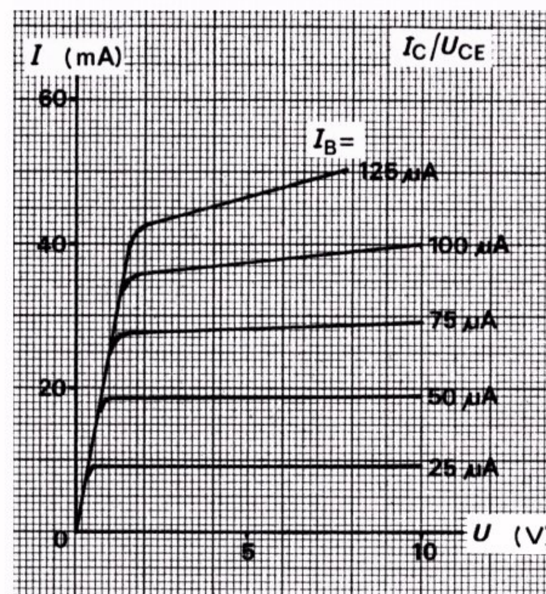
NAAM:

KLAS:

OEFENING



De transistor in deze schakeling heeft nevenstaande uitgangskarakteristieken.



- Bepaal het werkpunt.

  I_{CW} =

  U_{CEW} =

- Veronderstel dat een sinusvormige wisselstroom i_b wordt toegevoerd met een amplitude van 25 µA. Ga na tussen welke waarden de uitgangsspanning varieert.

u_{CE} varieert tussen: ______ en ______

B 212

GEAARDE EMITTERSCHAKELING MET EMITTERWEERSTAND

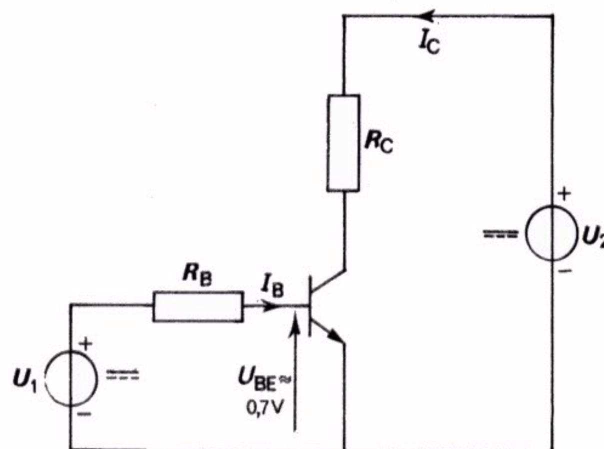
Bij de behandeling van de transistor zijn twee belangrijke punten nog niet ter sprake gekomen.

- *Twee transistors van hetzelfde type zijn nooit helemaal aan elkaar gelijk.* Bij metingen hebt u dit zelf kunnen constateren: andere meetgroepen vonden voor een grootheid als h_{FE} sterk afwijkende waarden. Zij gebruikten een transistor met een wat andere karakteristiek.
  Men zegt, dat transistors onderling *spreiding* vertonen.

- *Als de temperatuur van een transistor toeneemt, kunnen de karakteristieken aanzienlijk verschuiven.* Voeren we aan een transistor een constante U_{BE} toe, dan verschuift met toenemende temperatuur de overdrachtskarakteristiek en dus ook I_C, bij stijgende temperatuur sterk toe. Dit kan tot gevolg hebben dat de transistor defect gaat.

Deze spreidings- en temperatuurinvloeden zijn in de praktijk lastig. Hoe men deze invloeden kan verwaarlozen wordt in deze les besproken.

TRANSISTORSCHAKELING MET R_B



In het voorafgaande is dit eenvoudige schema toegepast om een transistor van zijn instelstromen te voorzien.
We hebben gezien, dat:

$$I_B = \frac{U_1 - U_{BE}}{R_B} = \frac{U_1 - 0,7}{R_B}$$

en $$I_C = h_{FE} \cdot I_B.$$

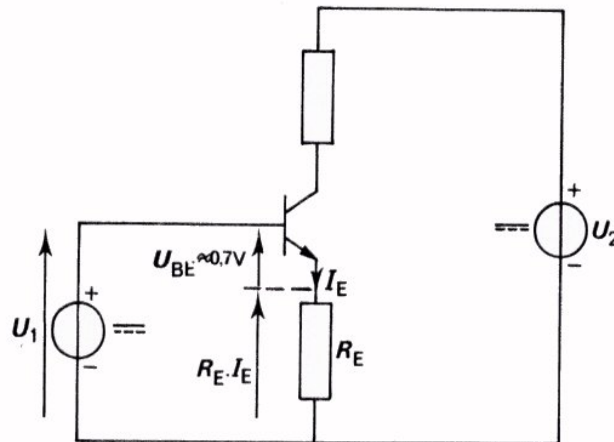
In deze formules komen twee grootheden voor die van de transistor afhangen: U_{BE} en h_{FE}.

U_{BE} is bij de meeste silicium transistors bij I_C's tot enkele tientallen mA vrijwel constant en gelijk aan ongeveer 0,7 V.
h_{FE} echter loopt bij transistors van hetzelfde type sterk uiteen. Bij de BD 137 bijvoorbeeld van 20 tot 90. Hierdoor zal ook I_C een grote spreiding hebben.

In de praktijk wil men dit liever niet.
Moet men bijvoorbeeld een serie radio's maken, dan wil men dat een bepaalde transistor in de gebruikte schakeling steeds dezelfde I_C heeft.
Vervangt men in een bestaande schakeling een transistor door een nieuwe van hetzelfde type, dan is er een grote kans dat deze nieuwe een geheel andere h_{FE} heeft. Daardoor krijgt men dan een geheel andere collectorstroom I_C.

Men past daarom dikwijls een wat andere schakeling toe, waarbij de I_C-waarde vrijwel onafhankelijk van de transistor wordt. Op het volgend blad zien we deze schakeling.

TRANSISTORSCHAKELING MET R_E



U ziet dat hier in de emitterleiding een weerstand R_E is aangebracht. Deze noemt men de *emitterweerstand*. De spanning over R_E is:

$$U_{RE} = U_1 - U_{BE}$$

waarin men U_1 groot kiest ten opzichte van U_{BE}. De stroom I_E door R_E is dus:

$$I_E = \frac{U_{RE}}{R_E} = \frac{U_1 - U_{BE}}{R_E}$$

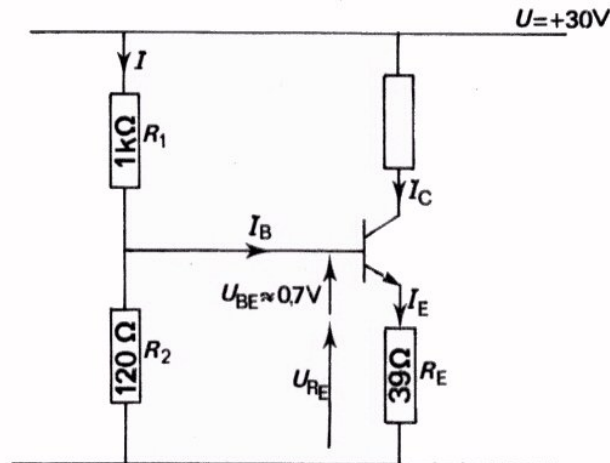
Uit deze formule volgt dat I_E afhangt van U_1, U_{BE} en R_E.

Op het vorige blad zeiden we reeds dat U_{BE} vrijwel constant is en ongeveer gelijk aan 0,7 V. I_E wordt dus bepaald door U_1 en R_E en dit zijn beide grootheden van de schakeling en niet van de transistor.
I_E is dus onafhankelijk van de transistor. We hebben al eerder gezien dat I_C en I_E bij een transistor ongeveer even groot zijn; immers I_B is klein ten opzichte van I_C.

De conclusie is dus:

Door het aanbrengen van een emitterweerstand R_E wordt de hoofdstroom I_C vrijwel *onafhankelijk* van de gebruikte *transistor*.

VOORBEELD VAN EEN BEREKENING AAN EEN SCHAKELING MET EMITTERWEERSTAND.



Hier ziet u een voorbeeld van een schakeling met een emitterweerstand R_E.
Ga volgende berekening zorgvuldig na.

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2} = \frac{30}{1120} = 27 \text{ mA}.$$

De spanning over R_2 is $120.27.10^{-3} = 3,2$ V. Dit is groot ten opzichte van $U_{BE} = 0,7$ V.

Wat verwaarlozen we bij deze berekening?

$U_{BE} = 0,7$ V

Dus $U_{RE} = 3,2 - 0,7 = 2,5$ V.

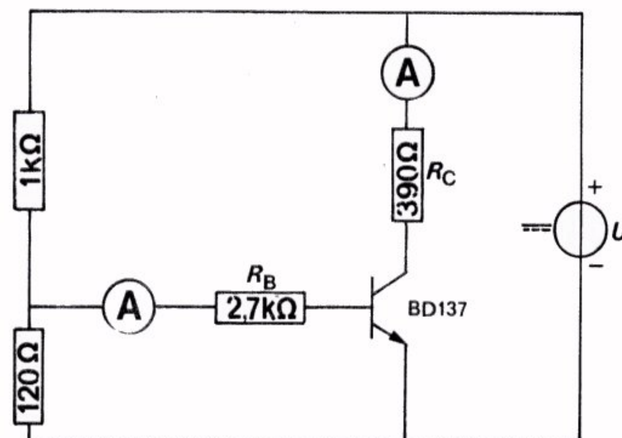
$$I_E = \frac{U_{RE}}{R_E} = \frac{2,5}{39} \approx 64 \text{ mA}.$$

$$I_C = I_E = 64 \text{ mA}.$$

In deze berekening komt de h_{FE} van de transistor niet voor. Voor een transistor met een geheel andere h_{FE} verloopt bovenstaande berekening precies zo. Onafhankelijk van de transistor vinden we dezelfde collectorstroom I_C.

De basisstroom $I_B = \frac{I_C}{h_{FE}}$ is nu wel afhankelijk van de toevallige transistor. Deze basisstroom is echter zeer klein en kan verwaarloosd worden ten opzichte van de stroom door R_1 en R_2.

OPDRACHT: METEN VAN I_B EN I_C IN EEN SCHAKELING MET R_B EN IN EEN SCHAKELING MET R_E.



- Bouw deze schakeling met R_B op uw paneel.
- Stel de voedingsspanning in op 30 V.
- Meet I_B en I_C.

I_B = [ ] en I_C = [ ]

- Breng de voedingsspanning terug tot 0 V.
- Geef de gemeten waarden op aan de leraar.
  Deze noteert I_B en I_C van alle meetgroepen op het bord.

  De I_B-waarden zullen niet veel verschillen.
  De waarden van I_C zullen wel sterk uiteenlopen.
- Sluit de basisweerstand R_B in de schakeling kort en neem een emitter-weerstand R_E = 39 Ω op.
- Meet I_B en I_C bij een voedingsspanning U = 30 V.

I_B = [ ], I_C = [ ]

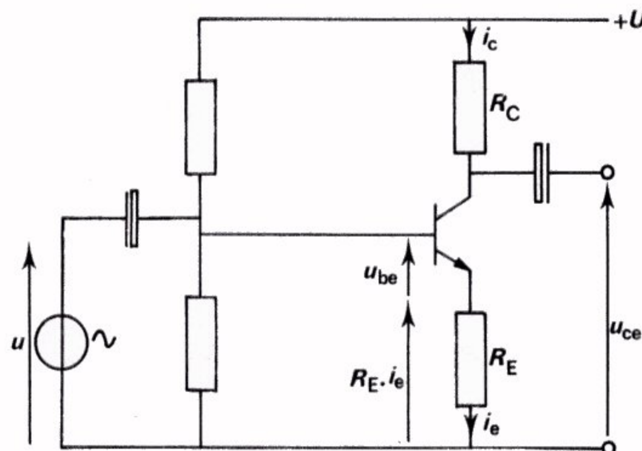
- Geef deze waarden op aan de leraar.
  Nu zal blijken dat de waarden van I_C onderling niet veel verschillen en de I_B-waarden wel.

CONCLUSIE

Het doel is bereikt. Door aanbrengen van R_E treedt er bijna geen verschil meer op in I_C bij verschillende transistors van hetzelfde type.

VERMINDERING VAN DE WISSELSPANNINGSVERSTERKING DOOR AANBRENGEN VAN DE EMITTERWEERSTAND.

We zagen dat het aanbrengen van R_E voordelen opleverde voor de gelijkstroominstelling. Meestal gebruikt men een GES om wisselspanning te versterken. Laten we eens nagaan wat de invloed van R_E is op de wisselspanningsversterking A_u.



De ingangswisselspanning u verdeelt zich over de transistor en de emitterweerstand.

$$u = u_{be} + R_E \cdot i_e.$$

De toegevoerde wisselspanning komt voor het overgrote deel over R_E te staan, terwijl aan de transistor een véél kleiner deel u_{be} wordt toegevoerd. Het zal duidelijk zijn dat de wisselstroomversterking:

$$A_u = \frac{u_{ce}}{u} \text{ veel kleiner geworden is.}$$

OPMERKING

Voor de wisselspanningsversterking geldt ongeveer:

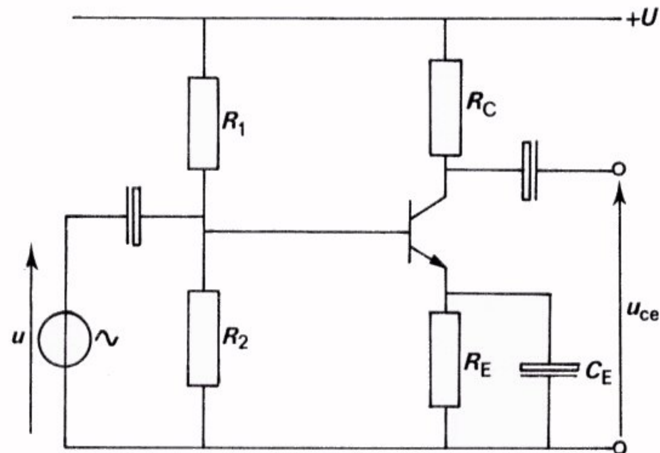
$$A_u \approx \frac{R_C}{R_E}$$

In de praktijk wordt R_E namelijk zó groot gekozen, dat $u_{be} << R_E i_e$. Dan is

$R_E . i_e \approx u$. Ook is $i_e \approx i_c$, zodat:

$$A_u = \frac{u_{ce}}{u} = \frac{R_c \cdot i_c}{R_E \cdot i_e} \approx \frac{R_C}{R_E}$$

De vermindering van de wisselspanningsversterking is uiteraard een nadeel van de emitterweerstand R_E. We kunnen dit nadeel echter eenvoudig verhelpen door het aanbrengen van een grote condensator C_E parallel aan R_E.



$X_{C_E} = \frac{1}{\omega C_E}$ vormt voor de wisselstroom i_e vrijwel een kortsluiting, zodat

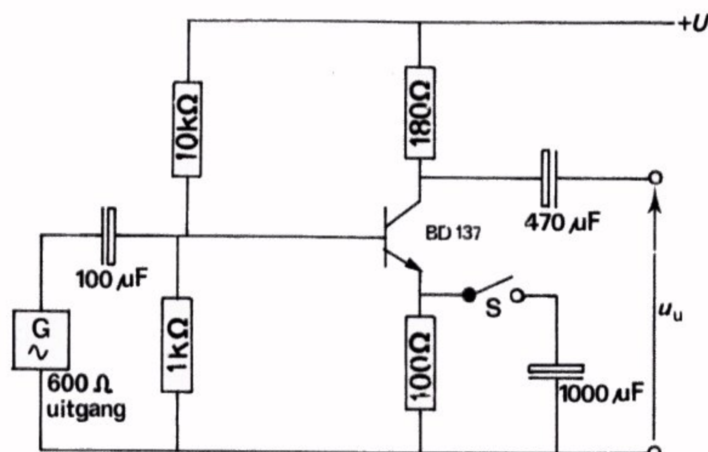
$u_{be} \approx u$.

Nu wordt een aanzienlijk grotere wisselspanningsversterking $A_u = \frac{u_{ce}}{u}$ bereikt.

Het aanbrengen van een grote condensator parallel aan een weerstand noemt men *ontkoppelen*.
Men zegt dat R_E door C_E is ontkoppeld.
De condensator heet "ontkoppelcondensator".

In een laatste opdracht gaan we A_u meten van een schakeling met R_E. Eerst voor het geval zonder C_E. Daarna voor de schakeling waarin R_E door C_E wordt ontkoppeld.

OPDRACHT: METEN VAN A_u IN DE GES MET R_E.



- Bouw bovenstaande schakeling.

- Stel U in op 30 V en maak U_{it} = 25 mV bij 1 kHz. Houd S open.

- Meet u_u en bepaal A_u.

  U_{ut} = [mV] en A_u = [ ]

- Sluit S. Stel U_{it} weer in op 25 mV, meet u_u en bepaal weer A_u.

  U_{ut} = [mV] en A_u = [ ]

- Controleer of C_E de R_E goed ontkoppelt. Open daartoe eerst S. Stel U_{it} in op 25 mV en maak $R_E \cdot i_e$ zichtbaar met de oscilloscoop. Sluit daarna S, regel U_{it} op 25 mV en bekijk wat er dan overblijft als wisselspanning over R_E tenminste 10 maal kleiner geworden is.

Conclusie: R_E wordt [wel/niet] voldoende ontkoppeld.

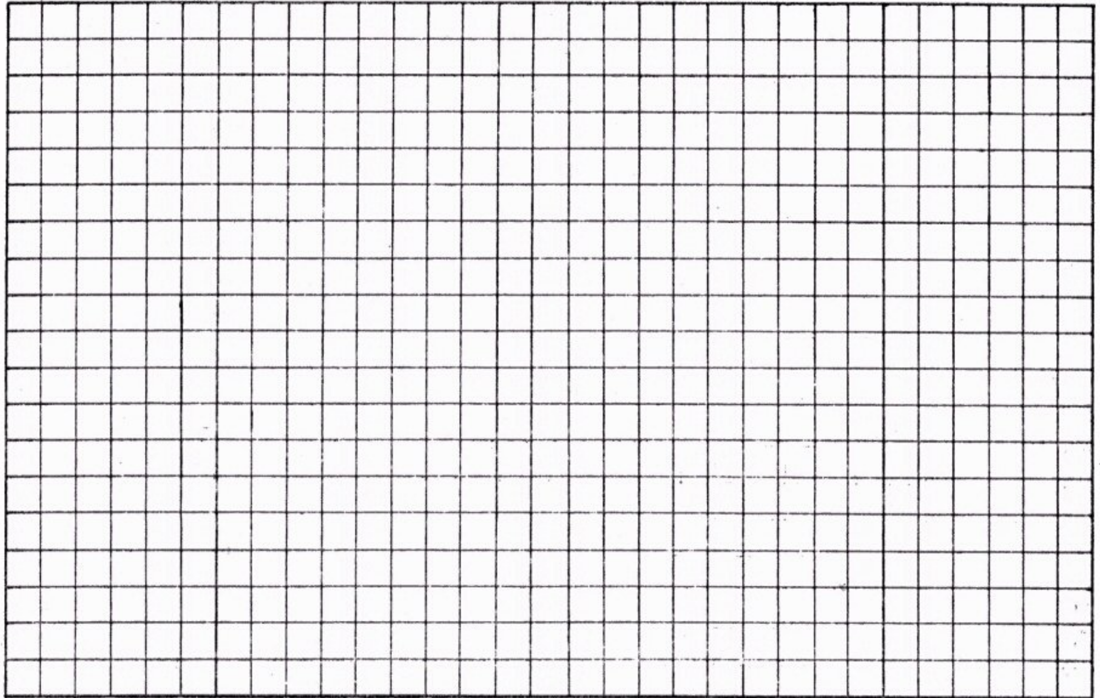
OEFENING

Teken hieronder het gelijkstroom- en het wisselstroomschema van de schakeling op blad B212.7.

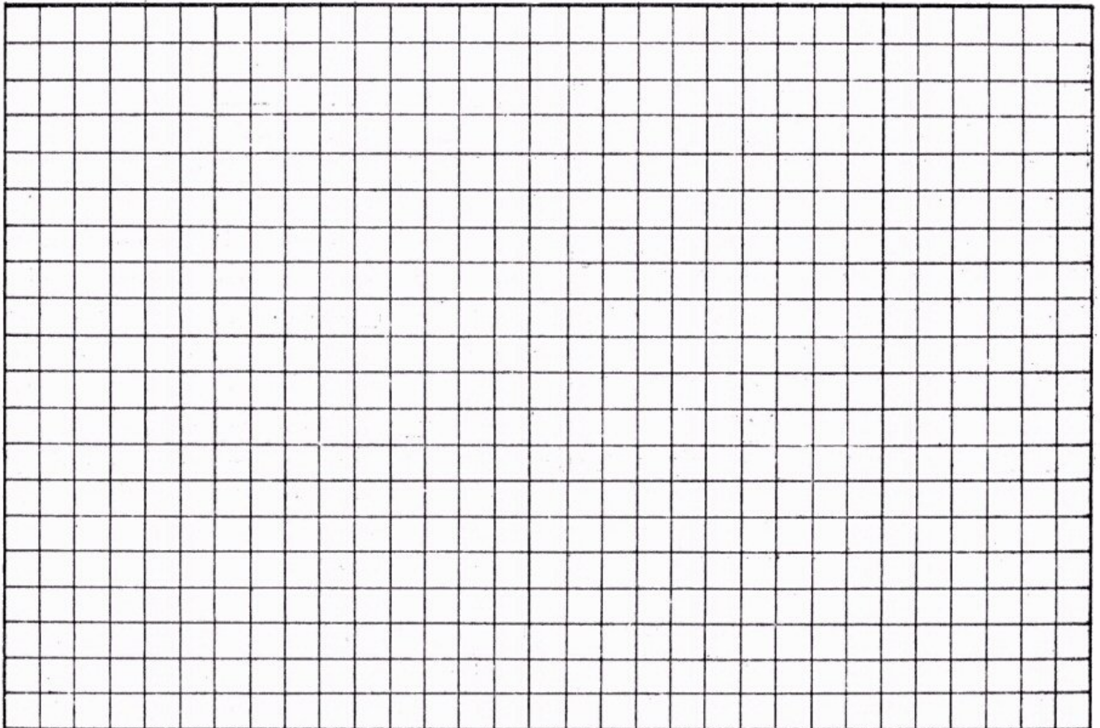
Geef daarbij aan:

I_B, I_C, U_{BE}, U_{CE} , i_b, i_c, u_{be} en u_{ce}.

Gelijkstroomschema



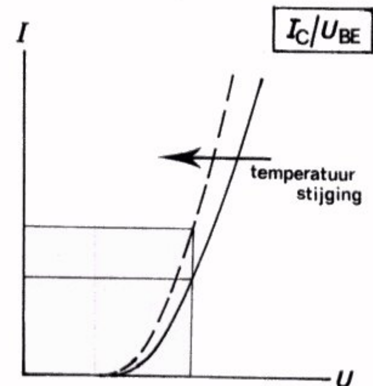
Wisselstroomschema



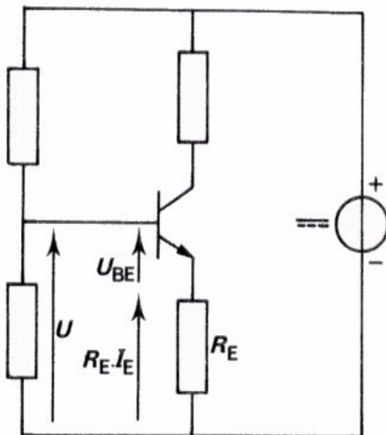
TEMPERATUURSTABILISATIE

We hebben gezien dat we door het aanbrengen van een emitterweerstand R_E de invloed van de *spreiding* bij transistors op de grootte van I_C vrijwel geheel weg kunnen nemen. Er is nog een tweede storende invloed op de grootte van I_C, namelijk de *temperatuur*. Ook deze wordt door het aanbrengen van R_E bestreden.

Met de temperatuurinvloed zit het als volgt:
De I_C - U_{BE} - overdrachtskarakteristiek is een soort diode-karakteristiek. Evenals de diodekarakteristiek verschuift hij bij temperatuurstijging naar de stroomas toe. Als U_{BE} constant is, heeft de verschuiving bij temperatuurstijging dus een sterke stijging van I_C tot gevolg.



Dit is om twee redenen ongewenst. In de eerste plaats treedt er bij elke schakeling na het inschakelen een temperatuurstijging op omdat er immers elektrisch vermogen aan de transistor wordt toegevoerd. In de tweede plaats kan de omgevingstemperatuur veranderen.



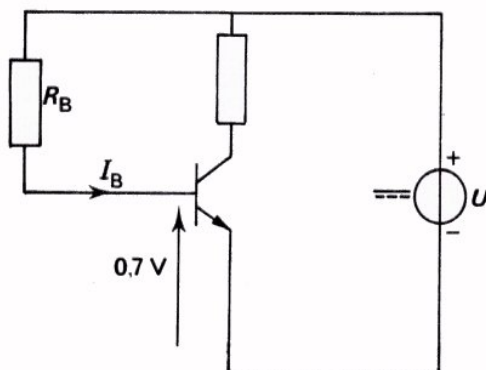
Hiernaast is de schakeling met R_E nog eens getekend. Hij werkt nu als volgt. Als de temperatuur stijgt, zal I_E toenemen. Hierdoor neemt ook de spanning $R_E \cdot I_E$ toe, waardoor $U_{BE} = U_1 - R_E \cdot I_E$ afneemt. Dit laatste werkt het toenemen van I_E tegen.

Trouwens ook nu geldt: $I_E = \dfrac{U_1 - U_{BE}}{R_E}$

en is nagenoeg onafhankelijk van de transistor. Door R_E wordt de schakeling minder afhankelijk van de temperatuur. Hij wordt door R_E *gestabiliseerd* voor de temperatuur.

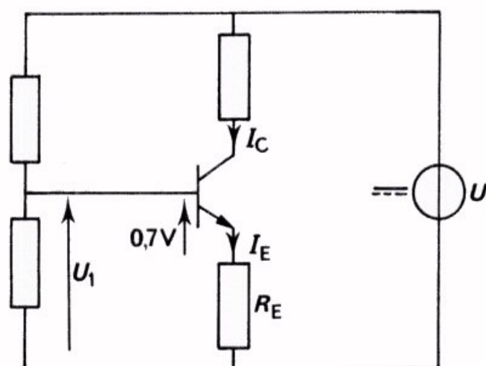
Conclusie: Door het aanbrengen van R_E wordt I_C vrijwel constant en onafhankelijk van de transistor gehouden. Dit is zowel van belang bij spreiding van de transistors als bij temperatuurveranderingen van de transistor.

SAMENVATTING



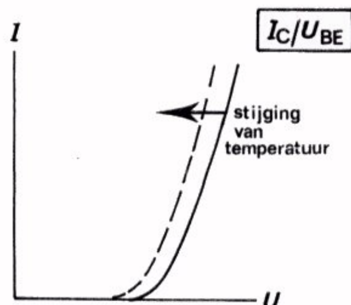
In deze schakeling met R_B geldt, dat $I_B \approx \dfrac{U - 0{,}7}{R_B}$.

I_B is vrijwel onafhankelijk van de eigenschappen van de transistor. Deze schakeling geeft voor transistors met verschillende h_{FE}'s zeer verschillende I_C's.

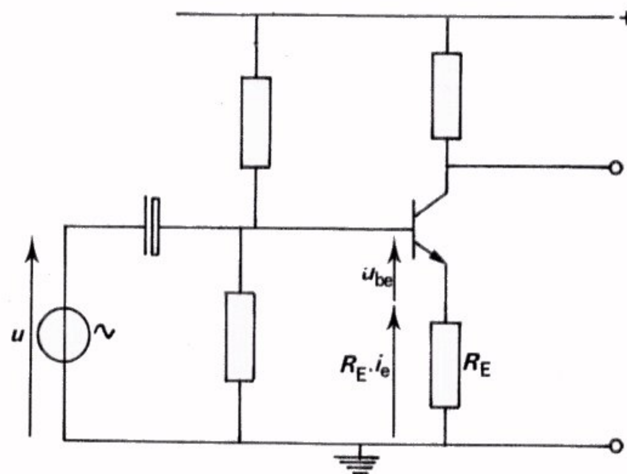


In deze schakeling geldt, dat $I_E \approx \dfrac{U_B - 0{,}7}{R_B} \approx I_C$.

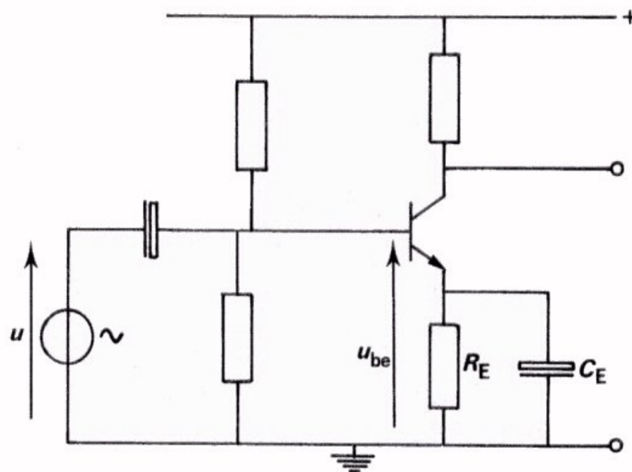
I_C is vrijwel onafhankelijk van de eigenschappen van de transistor. Deze schakeling heeft voor transistors met verschillende h_{FE}'s nagenoeg dezelfde I_C en dit wil men bij de meeste toepassingen.



Ook de invloed van temperatuurveranderingen, waardoor de I_C - U_{BE} - karakteristiek opschuift, wordt door het aanbrengen van R_E bestreden.
Als de temperatuur stijgt, neemt I_E en dus ook $R_E.I_E$ toe, waardoor $U_{BE} = U_1 - R_E.I_E$ afneemt; dit werkt de toeneming van I_E tegen.

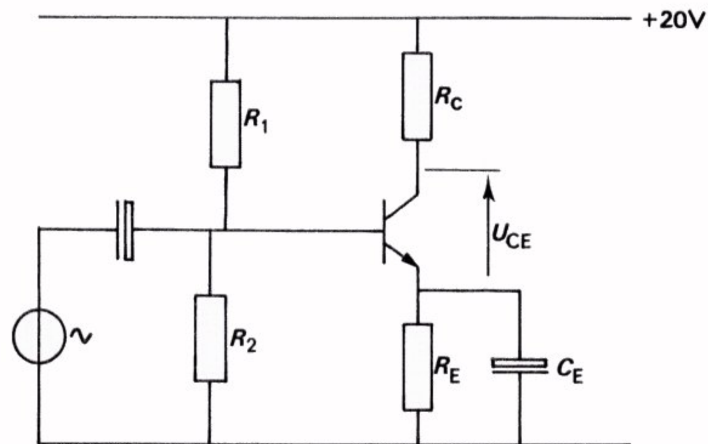


De schakeling met R_E heeft als nadeel dat de wisselspanningsversterking A_u kleiner is dan die in de schakeling met R_B. Dan komt niet de gehele u tussen b en e te staan. Dit nadeel kan men opheffen door R_E me behulp van een grote C_E te ontkoppelen.



NAAM: [ ] KLAS: [ ]

OEFENING



In deze schakeling:

R_1 = 17,3 kΩ; R_2 = 2,7 kΩ;
R_E = 400 Ω; R_C = 1,8 kΩ.

Hoe groot is I_E ongeveer?

$I_E \approx$ [ ] mA

Hoe groot zijn U_{CE} en $R_C.I_C$ dan ongeveer?

$U_{CE} \approx$ [ ] V en $R_C.I_C \approx$ [ ] V

Hoe groot is A_u ongeveer als men C_E weglaat?

$A_u \approx$ [ ]

B 213

FORMULES BIJ DE TRANSISTOR IN GES

INLEIDING

In de voorafgaande lessen hebben we gezien wat een transistor is en hoe hij ongeveer werkt. Vrijwel direct daarna hebben we een transistor in een geaarde emitterschakeling opgenomen en hebben we vooral aan de hand van grafieken gezien hoe deze schakeling werkt. Bij deze behandeling zijn enkele grootheden ingevoerd, namelijk:

- de gelijkstroomversterkingsfaktor h_{FE}
- de wisselstroomversterkingsfaktor h_{fe}
- de spanningsversterking A_u
- de stroomversterking A_i
- de vermogensversterking A_p
- de ingangswisselstroomweerstand h_{ie}
- de steilheid S

In deze les gaan we deze grootheden nog eens bekijken en bovendien zullen we enkele eenvoudige formules afleiden die deze grootheden met elkaar in verband brengen.
Met behulp van die formules voeren we dan wat eenvoudige berekeningen uit aan de GES.

Op het eerste gezicht lijken deze formules misschien erg ingewikkeld.
In de praktijk blijkt het echter nogal mee te vallen.

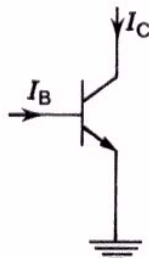
Tot uw geruststelling nog het volgende:
De afleidingen van de formules die in deze les gegeven worden zijn bedoeld om u een dieper inzicht te geven. Op een test zullen we ze u nooit vragen. Ga ze dus niet van buiten leren; dat heeft bij afleidingen trouwens nooit zin!

ENKELE VEEL GEBRUIKTE GROOTHEDEN.

Bij de transistor hebben we kennis gemaakt met een aantal grootheden. We zetten ze hier nog eens bij elkaar.

- *De gelijkstroomversterkingsfactor*

Hieronder verstaan we het quotiënt van de collectorgelijkstroom I_C en de basisgelijkstroom I_B.

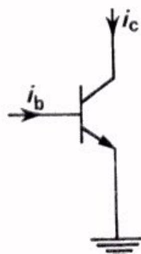


Gelijkstroomversterkingsfactor:

$$h_{FE} = \frac{I_C}{I_B}$$

- *De wisselstroomversterkingsfactor*

Dit is het quotiënt van de amplitude van de collectorwisselstroom i_c en die van de basiswisselstroom i_b.

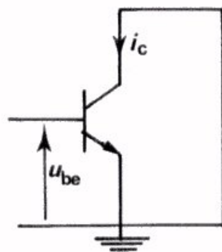


Wisselstroomversterkingsfactor:

$$h_{fe} = \frac{i_c}{i_b}$$

- *De steilheid*

Dit is het quotiënt van de collectorwisselstroom i_c en de ingangswisselspanning u_{be}.

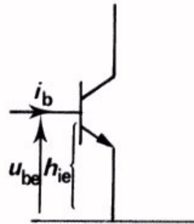


Steilheid:

$$S = \frac{i_c}{u_{be}}$$

De GES-ingangswisselstroomweerstand h_{ie}

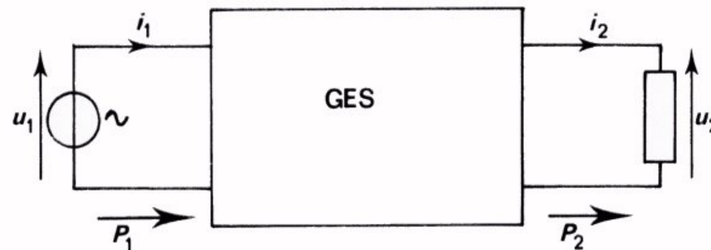
Dit is het quotiënt van wisselspanning en -stroom aan de ingang van de transistor in GES.



GES-ingangswisselstroomweerstand:

$$h_{ie} = \frac{u_{be}}{i_b}$$

Bovenstaande grootheden behoren direct bij de transistor zoals de fabrikant die gemaakt heeft. Hun grootte is alleen afhankelijk van de instelling van de transistor. De volgende grootheden zijn geen transistorgrootheden, maar grootheden van de gehele schakeling, waarin de transistor als versterkend element is opgenomen. We stellen zo'n schakeling voor door een "kastje" met een ingang en een uitgang.



Stellen we de wisselstroom en -spanning aan de ingang voor als i_1 en u_1 en die aan de uitgang door i_2 en u_2, dan is:

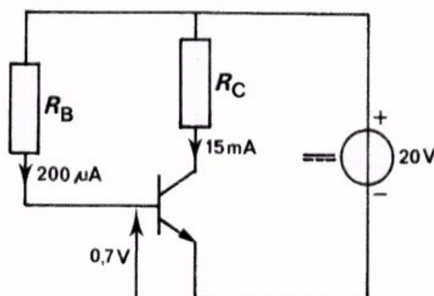
de wisselstroomversterking $$A_i = \frac{i_2}{i_1}$$

de wisselspanningsversterking $$A_u = \frac{u_2}{u_1}$$

de wisselstroomvermogensversterking $$A_P = \frac{P_2}{P_1} = A_u \cdot A_i$$

OEFENINGEN

1.



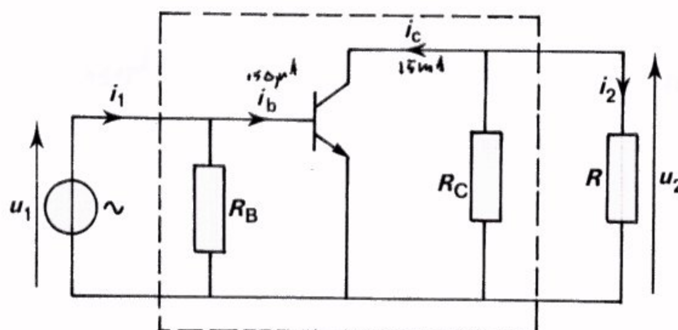
Hoe groot is h_{FE}?

h_{FE} =

Hoe groot is R_B?

R_B =

2.



U ziet hier het wisselstroomschema van een GES.

Gemeten is, dat:

I_{1_t} = 250 µA en U_{1_t} = 10 mV

I_{bt} = 150 µA

I_{ct} = 15 mA

I_{2_t} = 10 mA en U_{2_t} = 1,2 V.

Hoe groot zijn:

h_{fe}, A_i, A_u en A_p?

h_{fe} =

A_i = A_u = ; A_p =

S =

FORMULE VOOR DE WISSELSPANNINGSVERSTERKING MET DE GES.

Met een transistor kunnen we wisselstroom versterken. Als we een kleine basisstroom i_b toevoeren "maakt de transistor daarvan" een grotere collectorstroom i_c. Door in de collectorleiding een weerstand R_C op te nemen, zijn we ook in staat wisselspanning te versterken. Voor i_b is immers een spanning u_{be} nodig en over de collectorweerstand ontstaat een spanning $u_{ce} = R_C \cdot i_c$. De spanning u_{ce} kan groter zijn dan u_{be}, zodat dan wisselspanningsversterking optreedt. We hebben gezien dat we dit schrijven als:

$$A_u = \frac{u_{ce}}{u_{be}}.$$

Deze uitdrukking kunnen we anders schrijven:

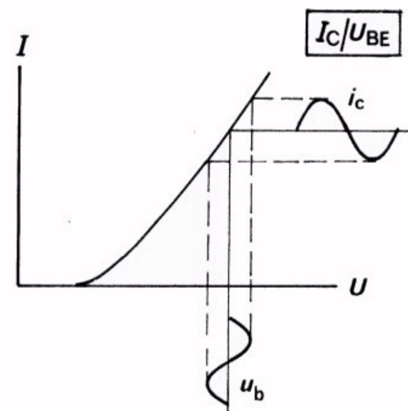
$$A_u = \frac{u_{ce}}{u_{be}} = \frac{R_C \cdot i_c}{u_{be}} = R_C \cdot \frac{i_c}{u_{be}}$$

Het quotiënt $\frac{i_c}{u_{be}}$ hebben we de steilheid S genoemd, zodat:

$$A_u = R_C \cdot S$$

of

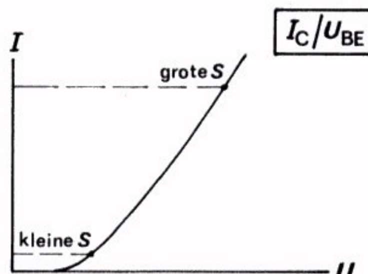
$$\boxed{A_u = S \cdot R_C}$$



in woorden:

De wisselspanningsversterking van een GES is gelijk aan het produkt van de steilheid en de grootte van de collectorweerstand.

Dit is een handige en veel gebruikte formule.
S is namelijk veelal bekend, zodat bij een gegeven collectorweerstand R_C onmiddellijk de wisselspanningsversterking uitgerekend kan worden.



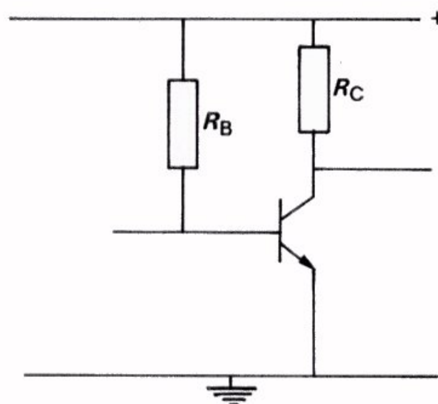
MERK OP: De grootte van S hangt af van de gelijkstroominstelling. Hoe groter I_C, des te grotere steilheid S en des te groter wisselspanningsversterking $S.R_C$.

VOORBEELD

In deze GES is de collectorweerstand R_C gelijk aan 1 kΩ.

Bij de gebruikte transistor is opgegeven voor de toegepaste instelling S = 100 mA/V.

Hoe groot is de wisselspanningsversterking A_u?



Oplossing:

$$A_u = S \cdot R_C$$

$$S = 100 \text{ mA/V} = 100.10^{-3} \text{ A/V}$$

$$R_C = 1 \text{ k}\Omega = 10^3 \ \Omega$$

$$A_u = 100.10^{-3}.10^3 = \underline{100}$$

OEFENING

Als men in bovenstaand voorbeeld alleen de collectorweerstand wijzigt en die 800 Ω maakt, hoe groot wordt dan A_u?

A_u = [ ]

Als men R_B groter maakt met behoud van dezelfde voedingsspanning, wat gebeurt er dan met de wisselspanningsversterking?

A_u blijft hetzelfde 0
wordt kleiner 0
wordt groter 0

Waarom?

____

____

____

____

____

FORMULE VOOR DE INGANGSWISSELSTROOMWEERSTAND.

De ingangswisselstroomweerstand van de GES is, zoals we weten:

$$h_{ie} = \frac{u_{be}}{i_b}$$

Dit kunnen we ook anders schrijven. We vermenigvuldigen teller en noemer eerst met h_{fe}:

$$h_{ie} = \frac{h_{fe} \cdot u_{be}}{h_{fe} \cdot i_b}$$

$$h_{ie} = \frac{h_{fe} \cdot u_{be}}{i_c}, \text{ want } i_c = h_{fe} \cdot i_b$$

$$h_{ie} = h_{fe} \cdot \frac{u_{be}}{i_c}$$

$$\boxed{h_{ie} = h_{fe} \cdot \frac{1}{S}}, \text{ want } S = \frac{i_c}{u_{be}}.$$

In woorden:

De ingangswisselstroomweerstand van een transistor in GES is gelijk aan het produkt van stroomversterkingsfactor en de omgekeerde waarde van de steilheid.

VOORBEELD

Voor een transistor is opgegeven $h_{fe} = 100$
bij een bepaalde instelling: $S = 50$ mA/V.

Hoe groot is dan de ingangswisselstroomweerstand van de transistor in GES?

Oplossing:

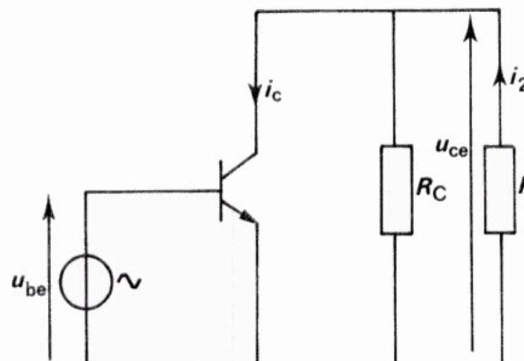
$$h_{ie} = h_{fe} \cdot \frac{1}{S}$$

$$= 100 \cdot \frac{1}{50} \frac{\text{V}}{\text{mA}} = \underline{2\ \text{k}\Omega}.$$

OEFENINGEN

1. Hier volgt een oefening waarbij u al het voorafgaande moet toepassen. Probeer de oplossingen "met verstand" te vinden.

wisselstroomschema



Voor de GES geldt:

S = 100 mA/V

h_{fe} = 500

R_C = 1,6 kΩ

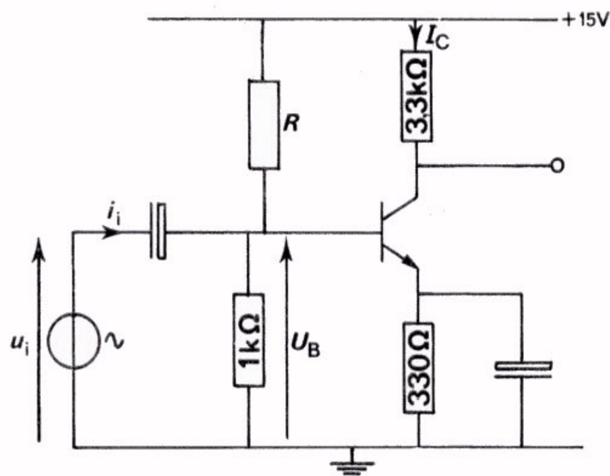
R = 400 Ω

u_{be} = 10 mV.

Bereken h_{ie}, i_b, i_c, u_{ce}, A_i, A_u en A_p.

h_{ie} =			
i_b =		A_i =	
i_c =		A_u =	
u_{ce} =		A_p =	

2. Nu nog een oefening waarbij een emitterweerstand in de schakeling is opgenomen.



Gegeven is: I_C = 2 mA

U_{it} = 18 mV

h_{ie} = 900 Ω

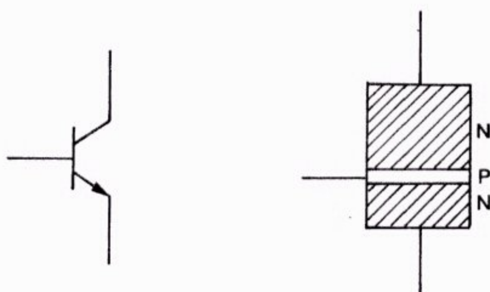
h_{fe} = 60

- Teken het wisselstroomschema.
- Bereken:

R =		U_B =	
I_{bt} =		A_i =	
I_{it} =		A_u =	
I_{ct} =		A_p =	
$U_{(ce)t}$ =		S =	

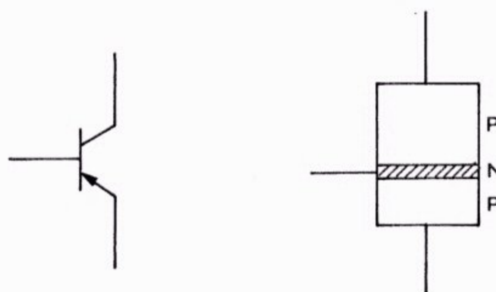
PNP - TRANSISTORS

Tenslotte nog iets over PNP-transistors.
De tot nu toe besproken transsitors bestaan uit twee N-laagjes silicium en daartussen één dun P-laagje silicium. We noemen ze de NPN-transistors.

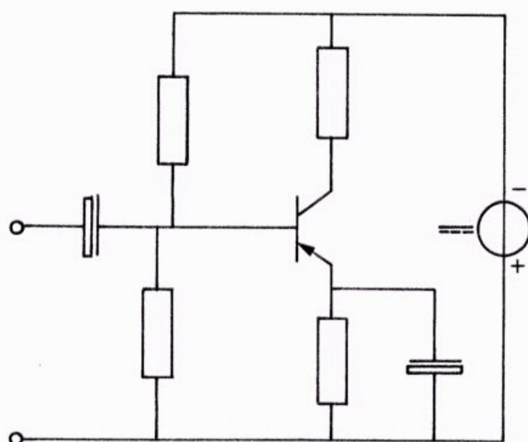


In het schemasymbool van de NPN - transistor wijst de pijl van basis naar emitter. Dit is tevens de richting van de gelijkstroom.

Er zijn ook nog zogenaamde PNP-transistors. Deze bestaan uit twee laagjes P-silicium en daartussen één dun laagje N-silicium.



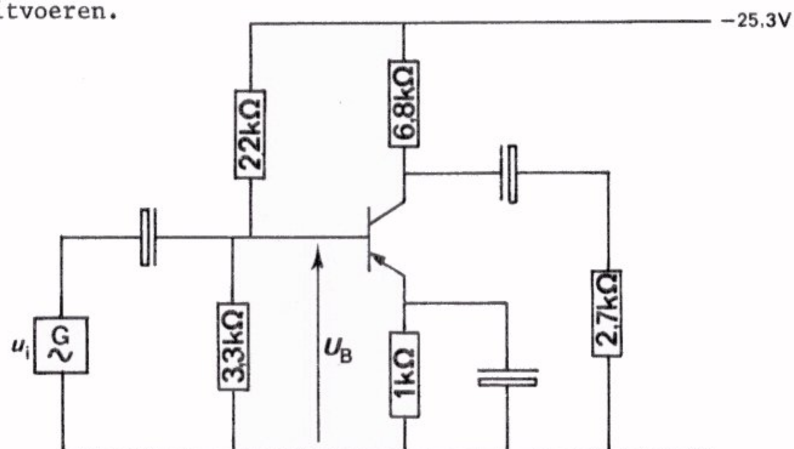
In het schemasymbool van de PNP - transistor wijst de pijl van emitter naar basis



De eigenschappen en de vorm van de karakteristieken zijn bij NPN- en PNP - transistors hetzelfde. Het verschil is de aansluiting van de voedingsspanning. Zoals de pijl in het symbool al aangeeft, is de richting van de gelijkstromen bij een PNP - transistor tegengesteld aan die van de gelijkstromen bij een NPN - transistor. Daarom moet de voedingsspanning tegengesteld worden aangesloten.

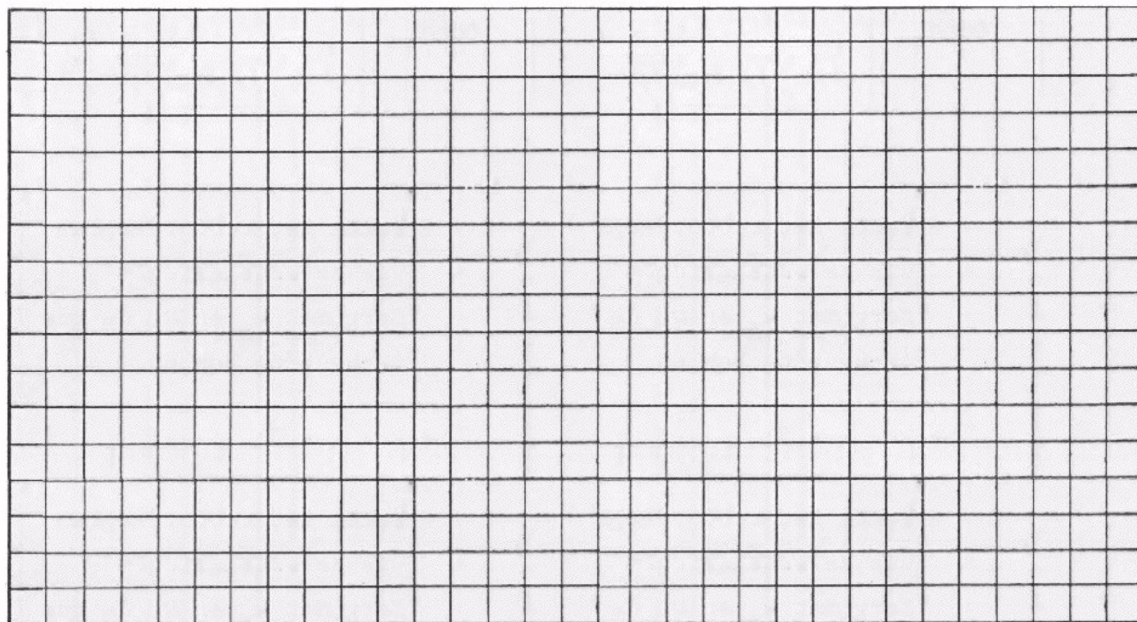
OEFENING

We laten u een beetje wennen aan de PNP - transistor door de al eerder aan de GES uitgevoerde berekening nu eens met een PNP - transistor te laten uitvoeren.



Van deze schakeling is gegeven: h_{fe} = 50 , S = 100 mA/V,
U_{it} = 10 mV, h_{ie} = 500 Ω.

Teken het gelijkstroomschema en het wisselstroomschema:



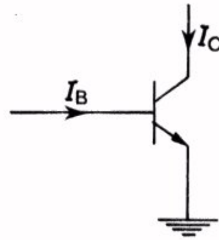
Geef in het gelijkstroom schema de richting van de *elektrische* stromen aan. Bereken U_B, I_C, U_{CE}, i_b, u_{ce} en A_u.

U_B = [ ]

I_C = [ ] I_{bt} = [ ] A_u = [ ]

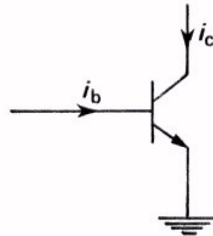
U_{CE} = [ ] $U_{(ce)t}$ = [ ]

SAMENVATTING



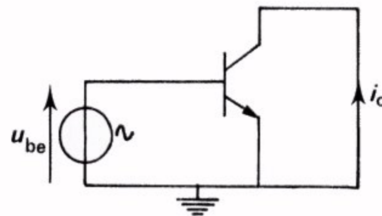
- Gelijkstroomversterkingsfactor

$$h_{FE} = \frac{I_C}{I_B}$$



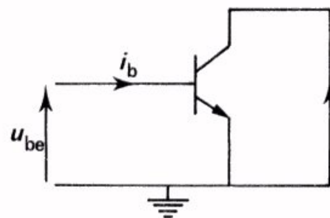
- Wisselstroomversterkingsfactor

$$h_{fe} = \frac{i_c}{i_b}$$



- Steilheid

$$S = \frac{i_c}{u_{be}}$$

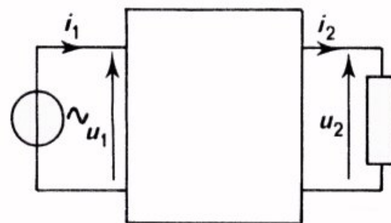


- GES - ingangswisselstroomweerstand

$$h_{ie} = \frac{u_{be}}{i_b}$$

- wisselstroomversterking

$$A_i = \frac{i_2}{i_1}$$

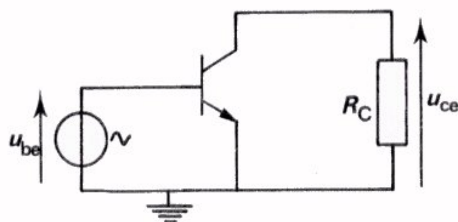


- wisselspanningsversterking

$$A_u = \frac{u_2}{u_1}$$

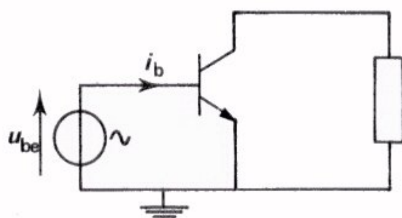
- wisselstroomvermogensversterking

$$A_p = \frac{P_2}{P_1} = A_i \cdot A_u$$



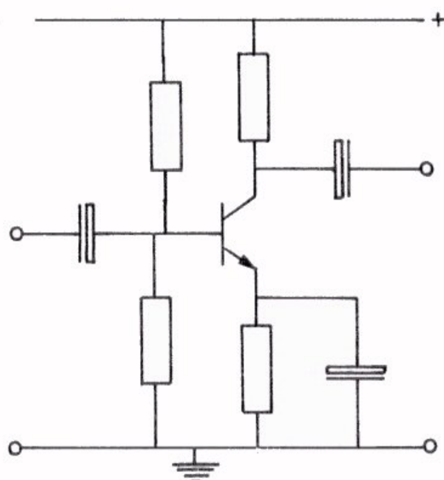
$$A_u = \frac{u_{ce}}{u_{be}} = S \cdot R_C$$

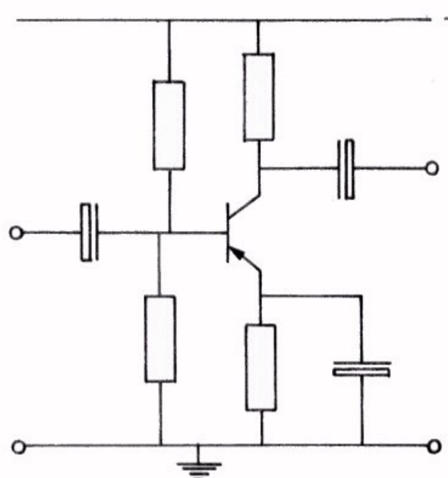
Bedenk: S is groter naarmate instelstroom I_C groter is.



$$h_{ie} = \frac{u_{be}}{i_b} = h_{fe} \cdot \frac{1}{S}$$

Bedenk: h_{ie} is kleiner naarmate instelstroom I_C groter is.





Bij een schakeling met een PNP - transistor is de voedingsspanning net andersom aangesloten als bij een overeenkomstige met een NPN - transistor. Hierdoor:

- heeft elke overeenkomstige gelijkspanning een tegengestelde polariteit (b.v. U_{BE} en U_{CE}).
- lopen alle gelijkstromen andersom.
- dienen alle elco's andersom aangesloten te worden.

NAAM: ____ KLAS: ____

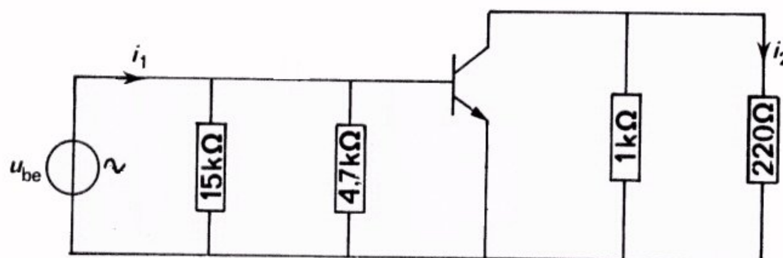
OEFENINGEN

1. Een GES is ingesteld op I_C = 2 mA. Zijn h_{ie} is dan 1 kΩ. Hoe groot wordt zijn h_{ie} als men I_C zoveel groter maakt dat zijn steilheid 4 maal zo groot wordt?

h_{ie} = ____

2. Van een GES vindt men door meting h_{ie} = 1200 Ω en h_{fe} = 300. Hoe groot is dan zijn steilheid?

S = ____ mA/V

3. 

Dit is het wisselstroomschema van een GES.

Gegeven is: h_{ie} = 1,25 kΩ
h_{fe} = 400
$U_{(be)t}$ = 1 mV.

Bereken S, A_i, A_u en A_p.

S = ____ mA/V A_i = ____

A_u = ____ A_p = ____

B 214

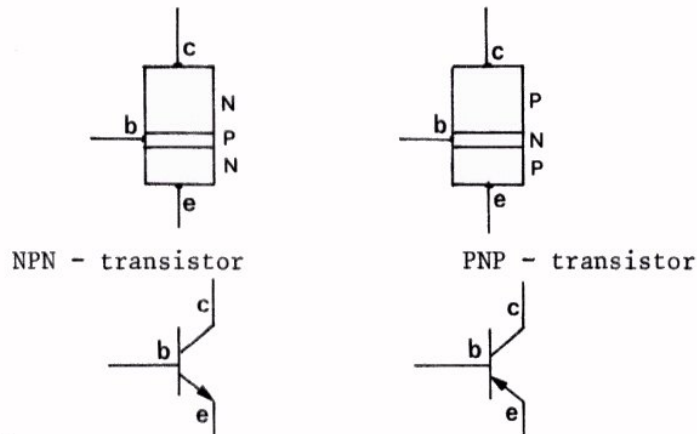
HERHALING TRANSISTOR 1

INLEIDING

We hebben nu 7 lessen achter de rug, waarin we kennis maakten met de lagenstransistor. Het is zeker geen gemakkelijk stuk uit het B-deel van de cursus. In deze les gaan we het voorgaande daarom nog eens grondig herhalen, voordat we ons verder verdiepen in het gebruik van de transistor. Deze les is ingevoegd zodat u de materie goed kunt verwerken; een testles kunnen we nog niet laten volgen omdat we dan vrijwel dezelfde vragen moeten geven, als in deze les opgenomen zijn.

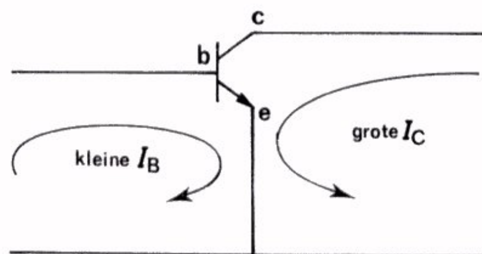
- Werk deze les goed door.
- Bestudeer de samenvattingen van de voorafgaande lessen nog eens goed.
- Als u iets nog niet geheel duidelijk is, vraag dan uw leraar om nadere uitleg.
- Let op in welke oefeningen u fouten maakt en ga vooral na waarom u die maakt.

- Een lagentransistor is een halfgeleidercomponent.
  Hij komt in twee uitvoeringsvormen voor.



De pijl in het schema symbool geeft de richting aan van de elektrische stroom.

- De werking is in de schakeling als volgt:



Een kleine I_B veroorzaakt een grote I_C.
Er treedt dus versterking op.

$\frac{I_C}{I_B}$ noemen we de *gelijkstroomversterkingsfactor*.

Deze wordt aangegeven met h_{FE}, dus:

$$h_{FE} = \frac{I_C}{I_B}$$

Dat we hier te maken hebben met een *gelijkstroom*versterkingsfactor kan men zien aan de hoofdletters F en E.

Hoe groot kan h_{FE} zijn?

h_{FE} ligt praktisch tussen 20 en 2000.

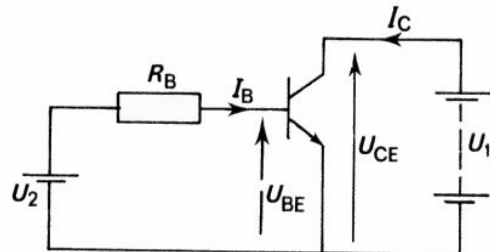
Dit te weten is van belang om te kunnen beoordelen of het resultaat van een meting of de uitkomst van een vraagstuk juist kan zijn.
Vindt men $h_{FE} = 3$ dan moet dit wel fout zijn. $h_{FE} = 10^6$ kan ook niet goed zijn.

DE GELIJKSTROOMSCHAKELING

Om een transistor te laten werken moet hij voorzien worden van twee gelijkspanningen en twee gelijkstromen: U_{BE}, U_{CE}, I_B en I_C.
U_{BE} is de gelijkspanning tussen basis en emitter.
U_{CE} is die tussen collector en emitter.
I_B en I_C zijn respektievelijk de basis- en de collectorgelijkstroom.
Deze spanningen en stromen kan men op verschillende manieren toevoeren.

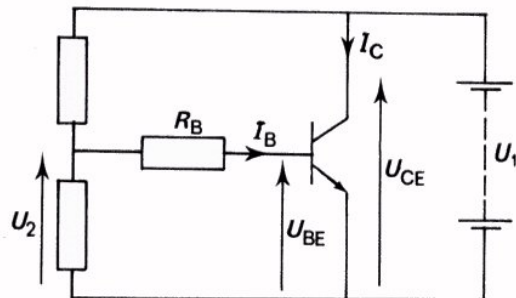
- Met twee spanningsbronnen.

  R_B is nodig om de transistor te beschermen tegen teveel stroom.



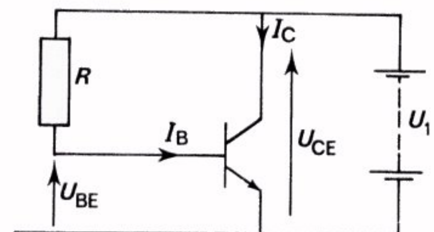
- Met één spanningsbron.

  De spanning U_2 wordt via een spanningsdeler verkregen uit dezelfde spanningsbron als U_{CE}.

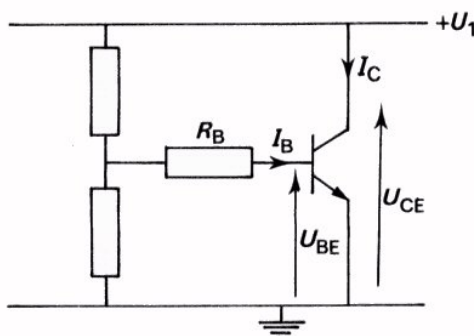


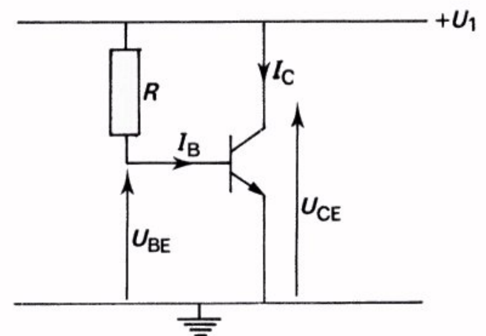
- Ook met één spanningsbron.

  Dit is de eenvoudigste schakeling met slechts één voedingsbron.



Vaak tekent men de spanningsbron helemaal niet en geeft dan het schema als volgt weer:



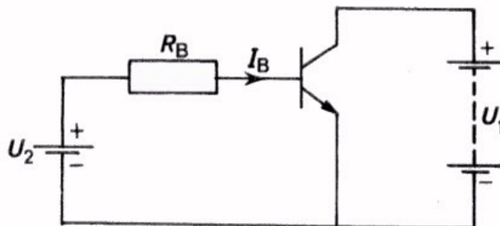


TEST UZELF

Opmerking vooraf.

U_{BE} is de doorlaatspanning van de diode tussen basis en emitter. Bij een siliciumdiode bedraagt deze ongeveer 0,7 V. Houd dit aan bij volgende oefeningen.

1.

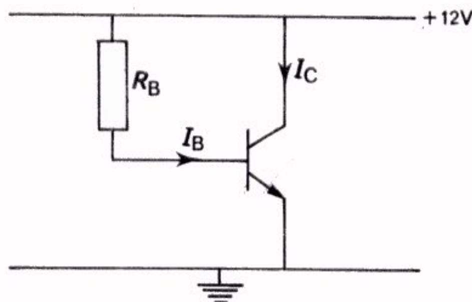


U_1 = 20 V en U_2 = 6 V.

Hoe groot moet men R_B nemen opdat I_B = 100 µA?

$R_B \approx$ [ ]

2.



Hier geldt dat I_C gelijk moet zijn aan 30 mA, terwijl h_{FE} = 100.

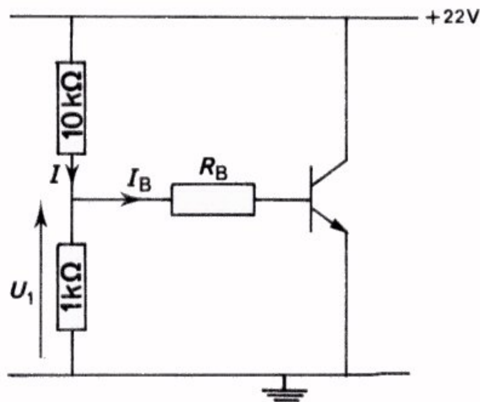
Hoe groot moet I_B dan zijn?

I_B = [ ]

Hoe groot dient men R_B te nemen?

$R_B \approx$ [ ]

3.



I_B is véél kleiner dan I.

Hoe groot is I ongeveer?

$I \approx$ [ ]

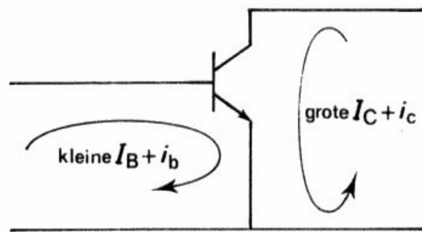
Hoe groot is U_1 ongeveer?

$U_1 \approx$ [ ]

Hoe groot dient R_B te zijn opdat I_B = 40 µA?

$R_B \approx$ [ ]

HET VERWERKEN VAN WISSELSTROOM DOOR EEN TRANSISTOR IN GEMEENSCHAPPELIJKE EMITTERSCHAKELING

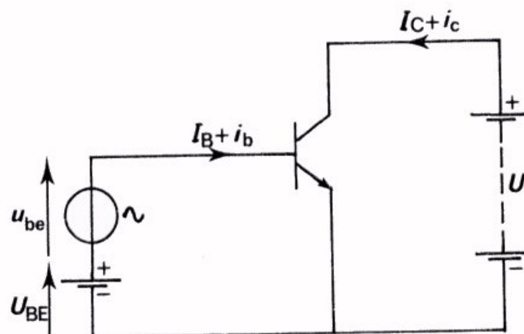


Men kan aan een transistor in GES behalve de gelijkstroom I_B ook nog een wisselstroom i_b toevoeren.
Er gaat dan behalve de gelijkstroom I_C ook een wisselstroom i_c lopen die veel groter is dan i_b. Er treedt dus wisselstroomversterking op.

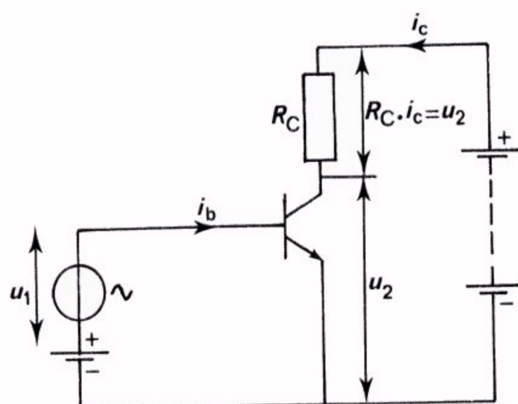
We noemen $\frac{i_c}{i_b}$ de wisselstroomversterkingsfactor h_{fe}.

$$h_{fe} = \frac{i_c}{i_b}$$

Hier kleine letters f en e, omdat het wisselstromen betreft.
i_c en i_b zijn in fase.



Om een kleine i_b toe te voeren is een kleine u_{be} nodig.

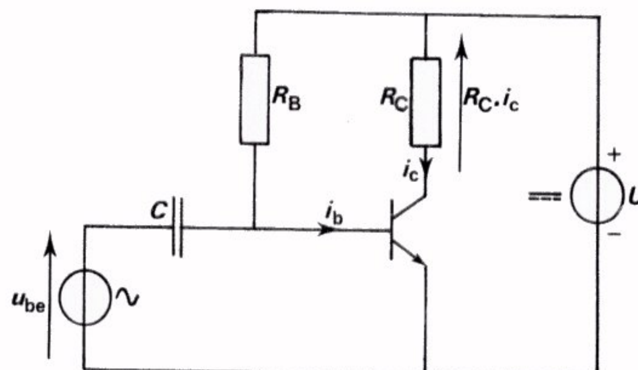


Om aan de uitgang niet alleen een versterkte wisselstroom, maar ook een versterkte wisselspanning te verkrijgen, brengt men een weerstand R_C in de collectorleiding aan.
Over R_C ontstaat een wisselspanning $R_C . i_c$ die meestal groter is dan u_1. Deze wisselspanning staat ook over de transistor.

Er vindt wisselspanningsversterking plaats.

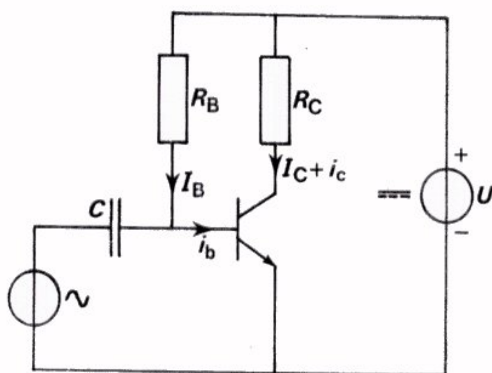
$$A_u = \frac{u_2}{u_1}$$

Een meer praktische GES ziet u in volgend schema. Hier wordt met één voedingsbron gewerkt.



De condensator C is aangebracht om basis en emitter voor gelijkspanning niet via de generator kort te sluiten. Voor wisselstroom is deze C vrijwel een kortsluiting.

TEST UZELF



I_C = 10 mA en I_{ct} = 5 mA
h_{FE} = 250 en h_{fe} = 200.

Bereken I_B en i_b.

I_B =

I_{bt} =

Hoe groot is R_C als de amplitude van de wisselspanning over R_C : U_t = 4 V bedraagt?

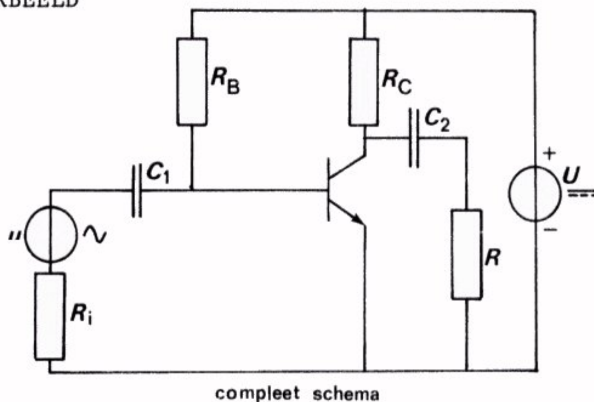
R_C =

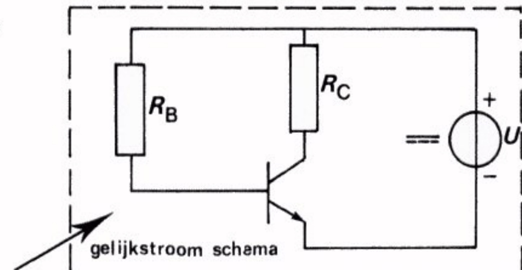
HET GELIJK- EN HET WISSELSTROOMSCHEMA

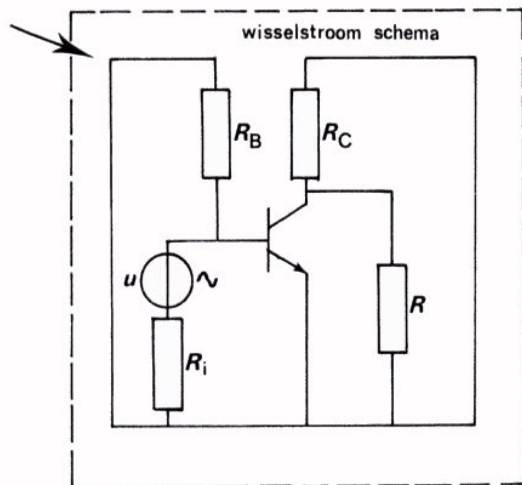
Men moet bij een transistorschakeling het *gelijkstroomgedrag* en het *wisselstroomgedrag* niet door elkaar halen. Om deze verwarring te voorkomen is het sterk aan te bevelen om telkens apart een gelijkstroomschema en een wisselstroomschema te tekenen.

In het gelijkstroomschema komt alleen dát voor wat voor de gelijkstroom en -spanning van belang is. In het wisselstroomschema alleen wat voor wisselstroom en -spanning nodig is.

VOORBEELD



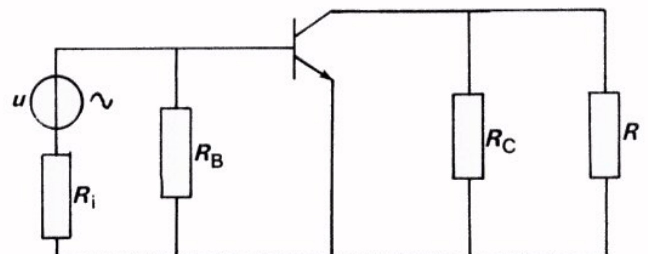




In het gelijkstroomschema komen C_1 en C_2 en hetgeen daarvoor (resp. daarachter) zit niet voor, omdat daar geen gelijkstroom kan lopen. In het wisselstroomschema komen C_1 en C_2 niet voor, omdat X_{C_1} en X_{C_2} beide nagenoeg nul zijn. Verder is ook de voedingsbron als een kortsluiting voor wisselstroom te beschouwen.

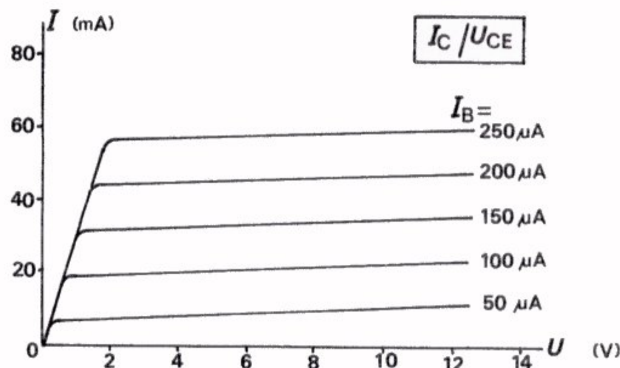
Tenslotte is het wisselstroomschema handiger te tekenen:

Men ziet nu beter dat R_B parallel aan de transistoringang staat. Bovendien dat R_C en R parallel aan de transistoruitgang staan en dat u_{ce} even groot is als de wisselspanning over R_C.

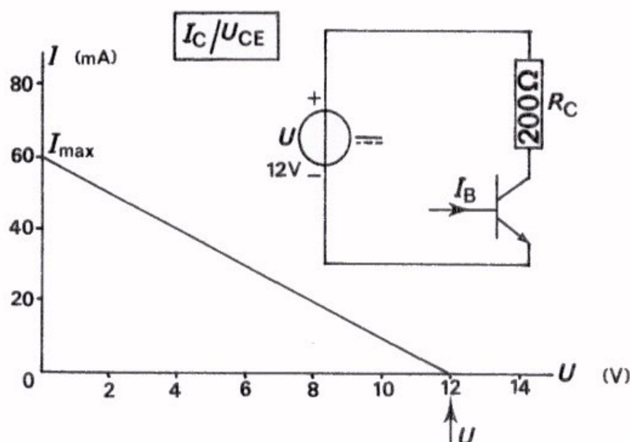


DE UITGANGSKARAKTERISTIEKEN EN DE BELASTINGSLIJN BIJ DE TRANSISTOR IN GES

Bij de behandeling van de transistor in de geaarde emitterschakeling hebben we een aantal karakteristieken leren kennen. We beginnen hier met de uitgangskarakteristiek die voor praktisch gebruik de belangrijkste is.
Met behulp van de uitgangskarakteristieken kan men de gelijkstroominstelling van de transistor goed overzien. Bovendien kan men nagaan hoe wisselstroom en -spanning verwerkt worden.

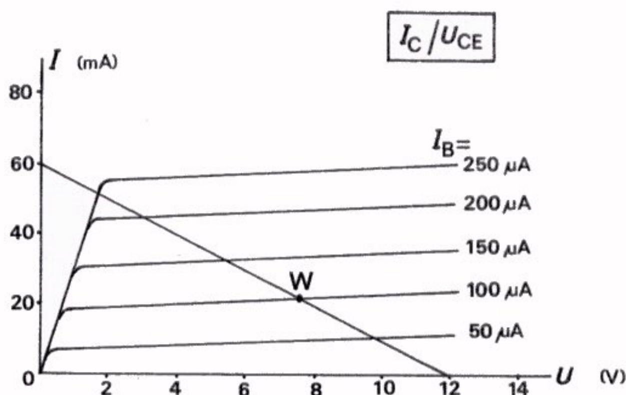


Men geeft altijd een bundel uitgangskarakteristieken. Elke karakteristiek geeft het verband tussen I_C en U_{CE} voor één bepaalde waarde van I_B.



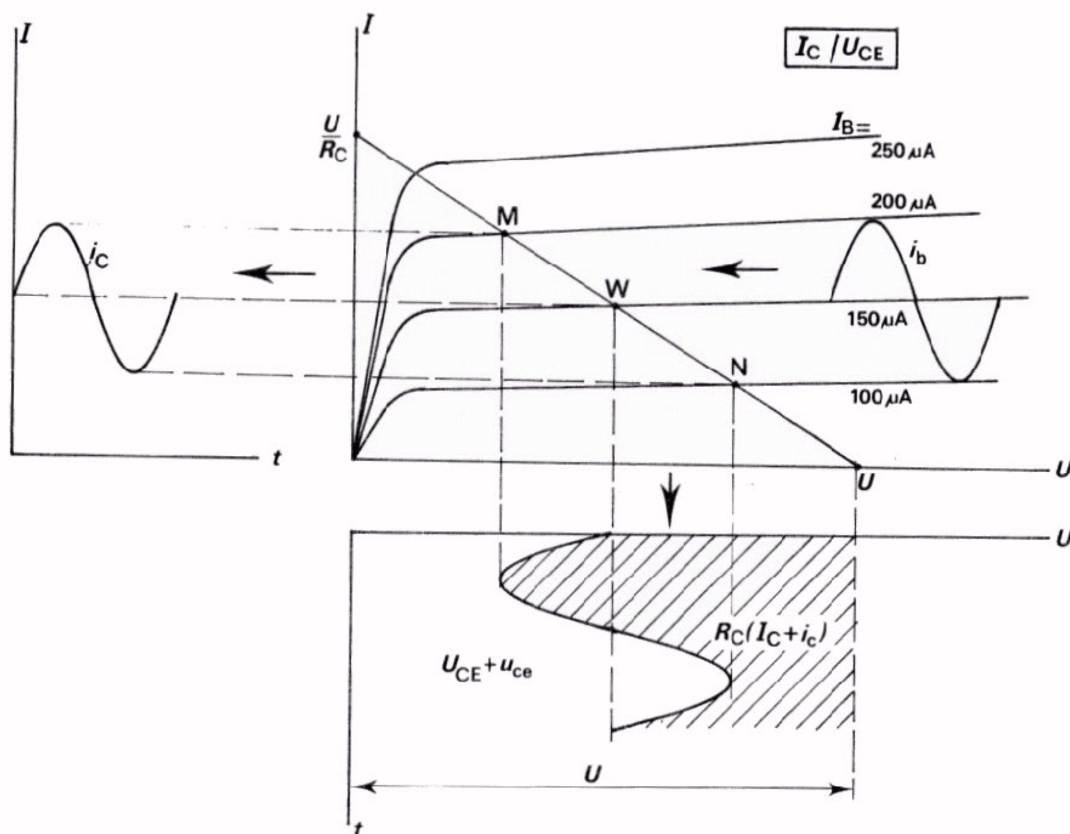
De transistor is als het ware aangesloten op de serieschakeling van de voedingsbron en de weerstand R_C.

De belastingslijn loopt van het punt U op de U_{CE}-as naar het punt $I_{MAX} = \frac{U}{R_C}$ op de I_C-as.



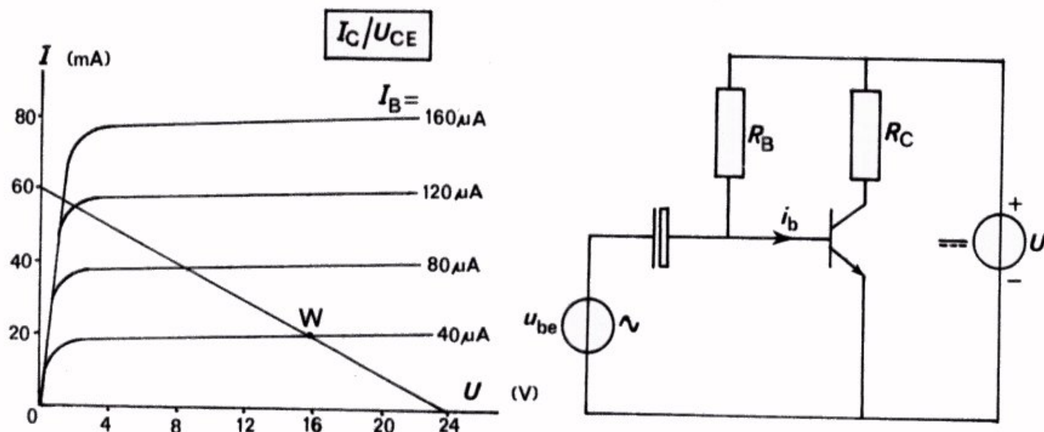
Door nu de uitgangskarakteristieken te combineren met de belastingslijn vindt men het instelpunt W bij een bekende waarde van I_B.
In dit voorbeeld I_B = 100 µA.

Wordt er aan de transistor behalve de instelstroom ook nog een wisselstroom i_b toegevoerd, dan schuift de instelling elke periode langs de belastingslijn heen en weer.
In volgend voorbeeld is dit getekend. De verschuiving geschiedt tussen de punten M en N. De basiswisselstroom heeft blijkbaar een amplitude i_b = 50 µA.



Door overhalen naar *links* kan men dan in een grafiek tekenen hoe groot I_C op verschillende ogenblikken is. Door overhalen naar *onder* kan men bovendien in een grafiek construeren hoe groot U_{CE} op verschillende momenten is.

Zo krijgt men een goed overzicht hoe de wisselstroom i_b door de transistor in GES wordt verwerkt.



Bovenstaande karakteristieken en de belastinglijn gelden voor de gegeven schakeling.

Ga na hoe groot de volgende grootheden zijn:

U =	V	I_C =	mA
U_{CE} =	V	$R_C . I_C$ =	V
R_C =			

Bereken R_B R_B =

In het werkpunt W geldt h_{FE} =

De maximale i_b waarbij nog net geen niet-lineaire vervorming optreedt bedraagt:

$I_{b(t)max}$ = µA

Niet-lineaire vervorming waarbij i_c aan beide zijden afgeplat gaat worden zal optreden als i_b groter wordt dan:

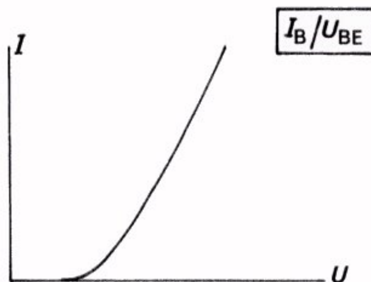
µA

KARAKTERISTIEKEN BIJ EEN TRANSISTOR IN GES

We hebben nog met twee andere karakteristieken kennis gemaakt.

- *De ingangskarakteristiek.*

Deze heeft het verloop van een diodekarakteristiek, omdat aan de ingang van een transistor een halfgeleiderdiode aanwezig is.

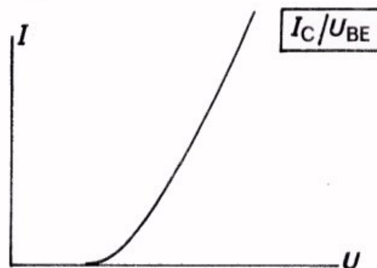


De eigenschappen aan de ingang van een transistor in GES kan men aan de hand van deze karakteristiek gemakkelijk inzien. Ten gevolge van de kromming van deze karakteristiek:

- neemt $R_{ing} = h_{ie}$ af als de instelgelijkstroom toeneemt;
- treedt niet-lineaire vervorming op bij toevoer van een grote wisselspanning u_{be}.

- *De overdrachtskarakteristiek.*

Bij deze karakteristiek staat I_C verticaal en U_{BE} horizontaal.



Aangezien $I_C = h_{FE} \cdot I_B$ kan men zich de overdrachtskarakteristiek ontstaan denken uit de ingangskarakteristiek door vermenigvuldiging met h_{FE}.
Ook hij verloopt dus als een diodekarakteristiek.

- Uit deze karakteristiek is duidelijk te zien dat bij grotere I_C ook grotere versterking optreedt. Dezelfde wisselspanning u_{be} geeft bij grotere I_C immers een grotere wisselstroom i_c.

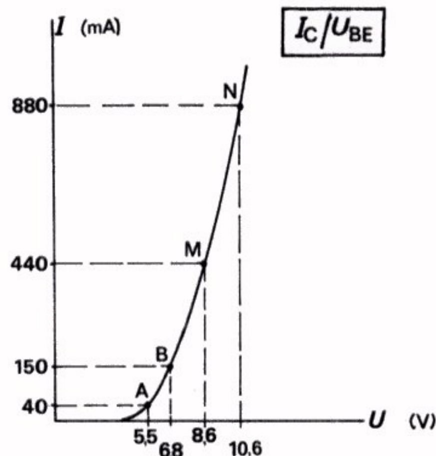
We noemen $\frac{i_c}{u_{be}}$ de steilheid S.

Van groot belang is: $A_u = S.R_C$

- Uit de overdrachtskarakteristiek blijkt dat bij grote u_{be} niet-lineaire vervorming van i_c aan de uitgang ontstaat.

TEST UZELF

1.



- Dit is een:

[ ] karakteristiek

- Bepaal de steilheid S tussen A en B

S = [ ]

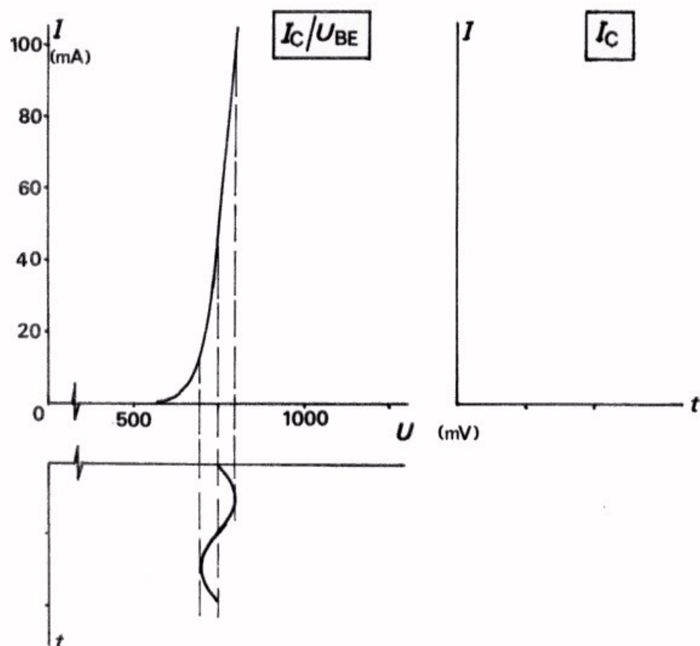
Bepaal S ook tussen M en N

S = [ ]

Hoe groot is de wisselspanningsversterking A_u als R_C = 1,2 kΩ in beide gevallen?

[ ] en [ ]

2.



Construeer de grafiek van I_C.

Bepaal de positieve en de negatieve topwaarde van de vervormde wisselstroom i_c.

I_{ct+} = [ ] mA

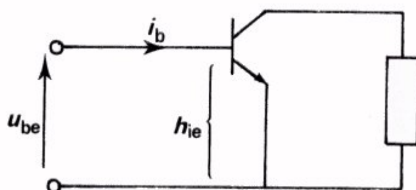
I_{ct-} = [ ] mA

Hoe groot is hier de steilheid?

S = [ ] mA/V

FORMULES

We hebben voor de GES een paar simpele formules afgeleid. We zetten deze formules hier nog eens bij elkaar.



Een GES aangesloten op een wisselstroombron vormt voor die bron een wisselstroombelastingsweerstand. Deze is de:

$$R_{ing} = h_{ie} = \frac{u_{be}}{i_b}$$

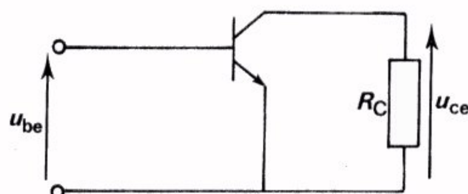
Deze ingangsweerstand blijkt als volgt samen te hangen met de steilheid S en de wisselstroomversterkingsfaktor h_{fe}.

$$\boxed{h_{ie} = h_{fe} \cdot \frac{1}{S}}$$

De wisselstroomversterking van een transistor in GES bedraagt:

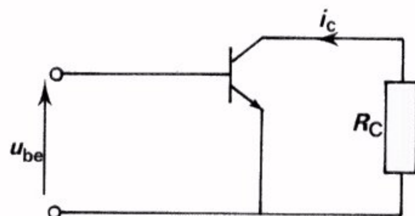
$$\boxed{\frac{i_c}{i_b} = h_{fe}}$$

Van een complete schakeling wordt de wisselstroomversterking A_i genoemd. A_i is kleiner dan h_{fe}.



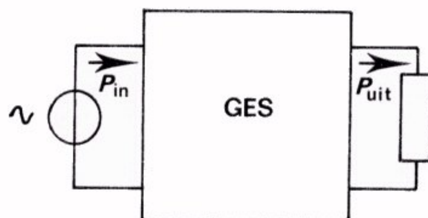
De wisselspanningsversterking A_u van een GES bedraagt:

$$\boxed{\frac{u_{ce}}{u_{be}} = A_u = S.R_C}$$



De uitgangswisselstroom i_c die er loopt als men u_{be} aan een GES toevoert is:

$$\boxed{i_c = S.u_{be}}$$



De wisselstroomvermogensversterking

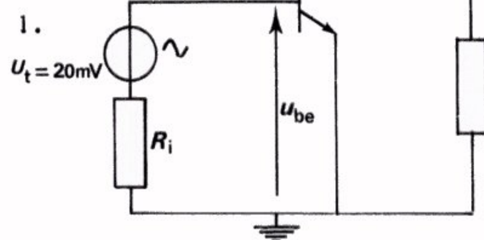
$$A_P = \frac{P_{uit}}{P_{in}}$$

bedraagt:

$$\boxed{A_P = A_u.A_i}$$

TEST UZELF

1.



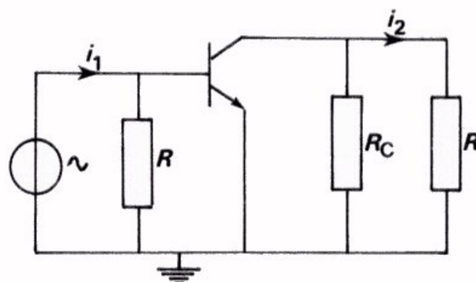
wisselstroomschema

R_i = 1 kΩ
h_{fe} = 400
S = 100 mA/V.

Bereken h_{ie} en u_{be}.

h_{ie} = [ ] kΩ
$U_{(be)t}$ = [ ] mV

2.



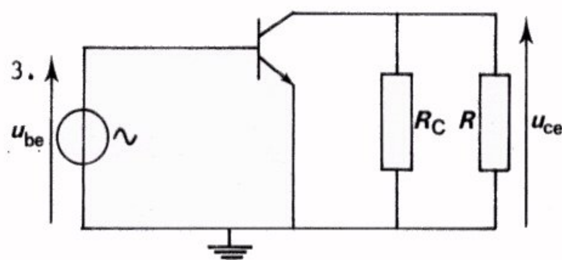
wisselstroomschema

R_B = 100 kΩ; h_{ie} = 2 kΩ;
R_C = 1 kΩ; R = 1 kΩ;
h_{fe} = 300.

Bereken hoe groot $A_i = \frac{i_2}{i_1}$ ongeveer is.

$A_i \approx$ [ ]

3.



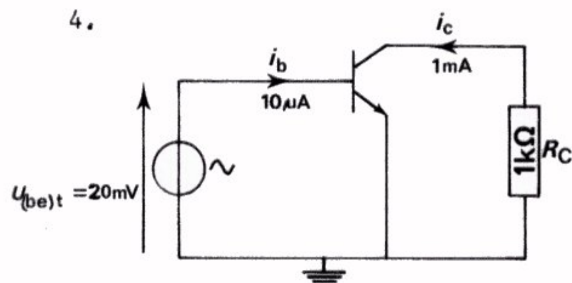
wisselstroomschema

R_C = 1 kΩ; R = 250 Ω;
S = 100 mA/V; $U_{(ce)t}$ = 0,2 V.

Bereken i_c en u_{be}.

$I_{c(t)}$ = [ ] mA
$U_{(be)t}$ = [ ] mV

4.



Bereken A_P.

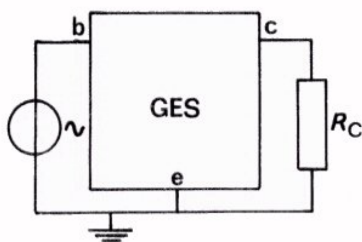
A_P = [ ]

B 215

DE GEMEENSCHAPPELIJKE BASISSCHAKELING

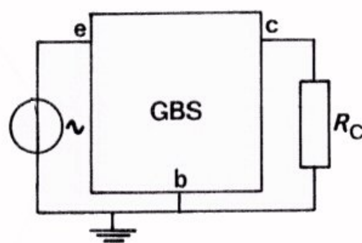
DE DRIE GRONDSCHAKELINGEN

Tot nu toe hebben we het bij de behandeling van de transistor steeds gehad over de gemeenschappelijke (of geaarde) emitterschakeling, de GES. Er zijn echter nog twee andere schakelingen mogelijk. Bij de ene is de collectoraansluiting gemeenschappelijk en bij de andere de basisaansluiting.
Hieronder ziet u de blokschema's van deze drie mogelijke schakelingen.



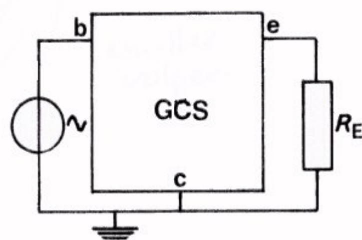
- GES

Gemeenschappelijke (of geaarde) emitterschakeling. De spanning wordt afgenomen over R_C.



- GBS

Gemeenschappelijke (of geaarde) basisschakeling. Ook hier wordt de spanning afgenomen over R_C.



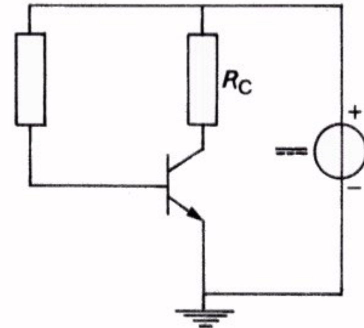
- GCS

Gemeenschappelijke (of geaarde) collectorschakeling. Hier wordt de spanning afgenomen over R_E. Deze schakeling heet ook *emittervolger*.

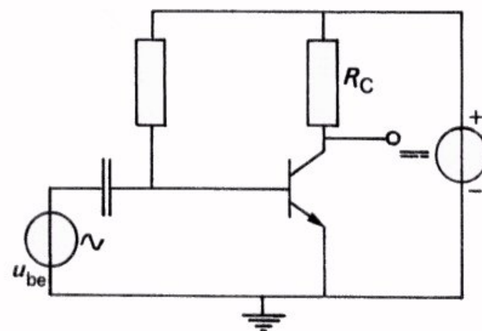
DE GEMEENSCHAPPELIJKE BASISSCHAKELING, GBS.

De gelijkstroomwerking van de transistor is in elk van de drie grondschakelingen in wezen hetzelfde. De gelijkstroomschema's zijn dan ook ongeveer gelijk. Het verschil zit in het toevoeren en afnemen van de wisselstroom en -spanning.

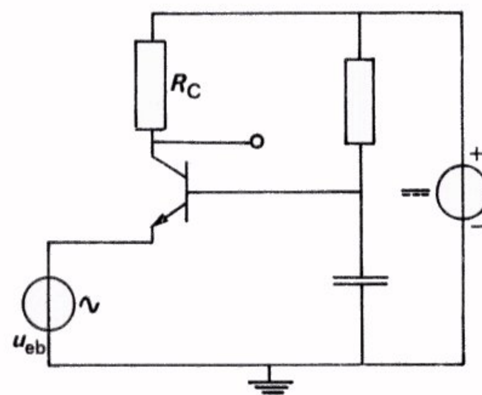
Hier ziet u een gelijkstroomschema dat we bij de GES gebruikten.



Bij de GES ligt de emitter voor de wisselstroom aan aarde en voert men de te versterken wisselspanning toe tussen *basis* en aarde.
De wisselspanningsbron voert een wisselspanning u_{be} toe en levert daarbij een *kleine* basiswisselstroom i_b.

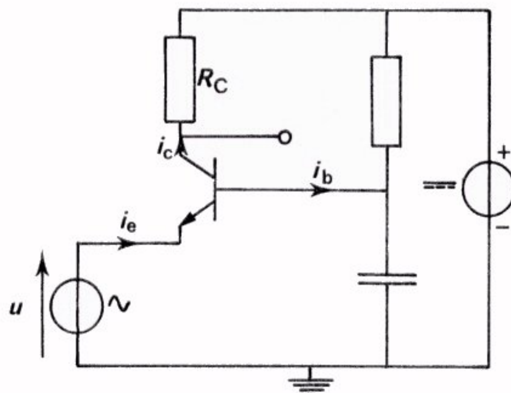


Bij de BGS ligt de basis voor wisselstroom aan aarde. Dit gebeurt via een C, waarvan X_C bijna 0 is, omdat de basis voor gelijkspanning niet aan de emitter mag liggen.
Men voert de te versterken wisselspanning nu tussen *emitter* en aarde toe, dus u_{eb}.
De wisselspanningsbron voert nu een wisselspanning u_{eb} toe en levert daarbij een *grote* emitterstroom i_e.



DE STROOMVERSTERKING BIJ DE GBS.

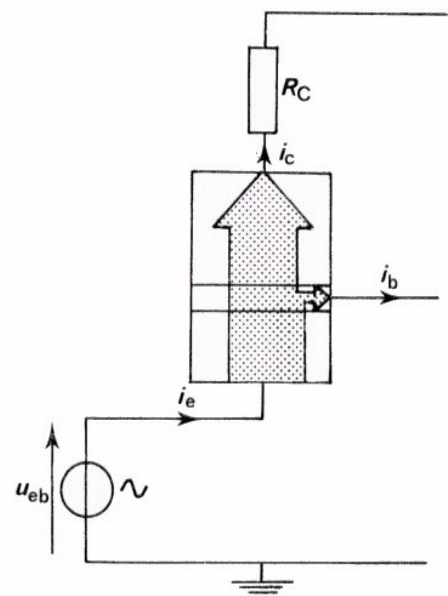
Hier ziet u het schema van de GBS nog eens.



Men voert aan de emitter een kleine te versterken u_{eb} toe en tevens een *grote* wisselstroom i_e.

Doordat in de transistor bijna alle stroom van de emitter direct doorgaat naar de collector, is I_C bijna even groot als I_E. Ook i_c zal dan bijna even groot zijn als i_e:

Het basisstroompje i_b is véél kleiner dan i_c.



Uit het feit dat i_c nagenoeg hetzelfde is als i_e volgt dat bij een transistor in GBS *geen* wisselstroomversterking optreedt.

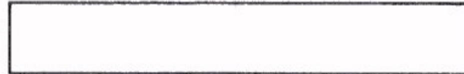
$$A_i \approx 1$$

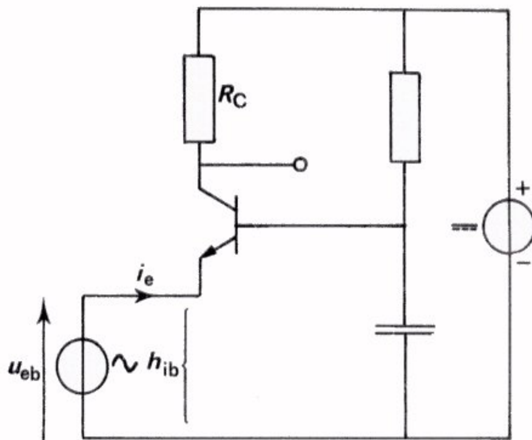
Men kan zich nu afvragen: "Als er geen wisselstroom versterkt wordt, wat heb je dan nog aan een GBS?"

Het antwoord hierop is: Een GBS kan wel wisselspanningsversterking geven. Dit zullen we op de volgende bladen zien.

DE SPANNINGSVERSTERKING BIJ DE GBS.

We maken eerst een afspraak: de ingangswisselstroomweerstand R_{ing} van een GBS duiden we aan met h_{ib}; i duidt op "ingang" en b op "gemeenschappelijke basis". Hoe noemen we de ingangswisselstroomweerstand bij een GES ook weer?





De ingangswisselstroomweerstand van deze schakeling is de weerstand van een halfgeleiderdiode die in doorlaatrichting staat, nl. de e-b-overgang. u_{eb} is de wisselspanning over deze diode en i_e de wisselstroom door de diode. De pijlrichting voor i_e in de figuur komt overeen met de *afgesproken* positieve stroomrichting voor de wisselstroom. We weten dat de wisselstroomweerstand van een diode in doorlaatrichting zeer klein is. Dit betekent dat ook h_{ib} *zeer klein is.*

$$R_{ing} = h_{ib} = \frac{u_{eb}}{i_e} = \text{zeer klein}$$

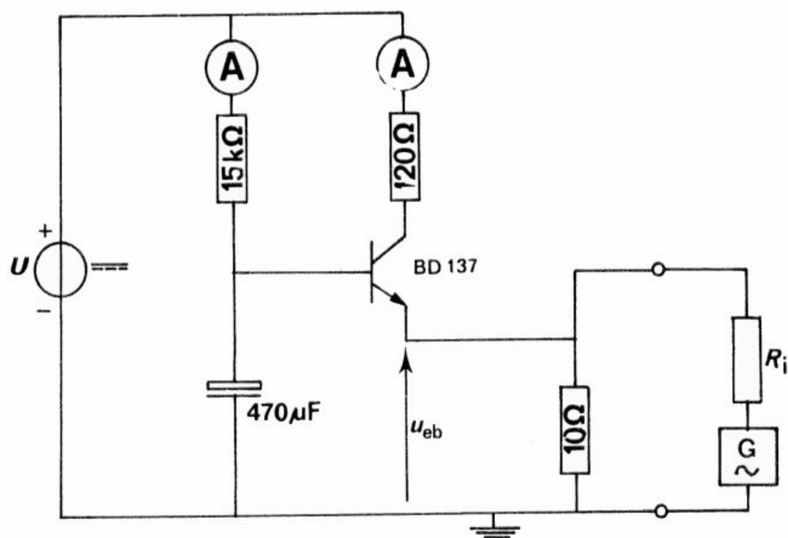
Als we een GBS met een GES vergelijken, zal de GBS de voorafgaande generator of schakeling veel sterker belasten dan een GES. Immers, h_{ib} is veel kleiner dan h_{ie}.

Nemen we een R_C in de schakeling op die groter is dan h_{ib}, dan ontstaat de volgende situatie:

Door h_{ib} en R_C loopt (nagenoeg) dezelfde stroom. R_C is groter dan h_{ib}, zodat over R_C een grotere spanning staat dan over h_{ib}.
De conclusie is dus dat er dan wisselspanningsversterking plaatsvindt.

$$A_u = \frac{R_C}{h_{ib}} \approx SR_C.$$

OPDRACHT: METEN AAN EEN GBS



- Bouw deze GBS.

- Schakel de wisselspanningsgenerator nog niet in.

- Meet I_C en I_B bij U = 20 V.

  I_B = [mA] I_C = [mA]

  Hieruit volgt: h_{FE} = [ ]

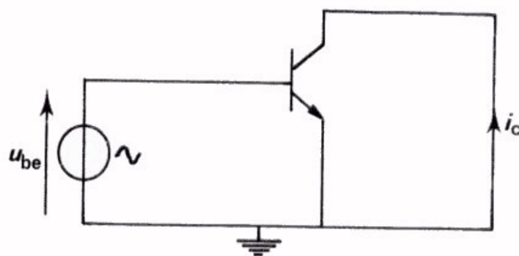
- Voer nu bovendien een u_{eb} toe met een frequentie van 1 kHz en een amplitude van 20 mV. Gebruik de 600 Ω-uitgang van de generator. Trigger de oscilloscoop extern.

- Meet vervolgens u_{cb} met de oscilloscoop. u_{cb} = [mV]

- Treedt er faseverandering op?

- Bereken de versterking $A_u = \frac{u_{cb}}{u_{eb}}$ A_u = [ ]

DE STEILHEID EN DE WISSELSPANNINGSVERSTERKING

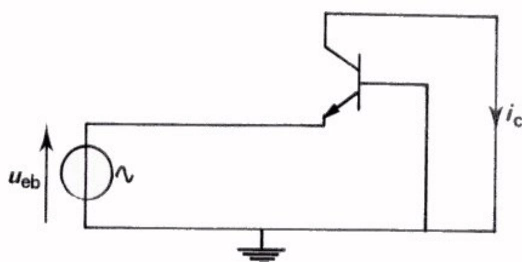


Bij de behandeling van de GES is het begrip steilheid S besproken.

S is de verhouding van de uitgangswisselstroom i_c tot de ingangswisselspanning u_{be}:

$$S = \frac{i_c}{u_{be}}$$

Ook bij een GBS kan men de grootheid steilheid S toepassen:

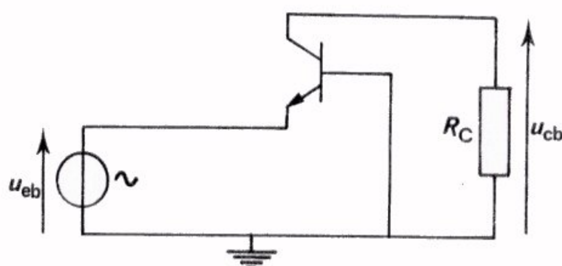


$$S = \frac{i_c}{u_{eb}}$$

Deze steilheid is uiteraard dezelfde als die bij de GES. Of men nu u_{be} of een even grote u_{eb} toevoert, de veroorzaakte i_c zal er even groot om blijven.

Net zoals de wisselspanningsversterking $A_u = \frac{u_{ce}}{u_{be}}$ bij een GES gelijk is aan $A_u = S \cdot R_C$,

is ook $A_u = \frac{u_{cb}}{u_{eb}}$ bij een GBS gelijk aan $\boxed{A_u = S \cdot R_C}$



Het enige verschil tussen de GES en de GBS wat de wisselspanningsversterking betreft is:

bij de GES treedt 180° faseverandering op, bij de GBS treedt géén faseverandering op.

VOORBEELD

Als bij een bepaalde gelijkstroominstelling van een transistor in GBS geldt S = 100 mA/V, terwijl er een R_C is aangebracht van 220 Ω, dan geldt:

$$A_u = S \cdot R_C = (100.10^{-3}) \cdot 220 = 22$$

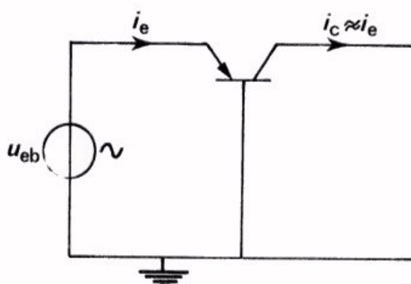
Oefening:

Hoe groot is A_u als S = 80 mA/V en R_C = 3,3 kΩ?

A_u = [ ]

DE INGANGSWISSELSTROOMWEERSTAND h_{ib} IN FORMULE

De ingangswisselstroomweerstand h_{ib} van een GBS is nogal klein. De grootte van h_{ib} kan men uitdrukken in de steilheid S. Dit gaat als volgt.



De ingangswisselstroomweerstand is

$$h_{ib} = \frac{u_{eb}}{i_e} \approx \frac{u_{eb}}{i_c}$$

We weten dat $S = \frac{i_c}{u_{eb}}$.

Hieruit volgt dus:

$$\boxed{h_{ib} \approx \frac{1}{S}}$$

Voor h_{ie} hebben we geleerd: $h_{ie} = h_{fe} \cdot \frac{1}{S}$.

De ingangswisselstroomweerstand bij de geaarde basisschakeling is dus h_{fe} maal zo klein als die bij de geaarde emitterschakeling.

Hierin komt weer duidelijk tot uitdrukking dat een GBS een voorafgaande schakeling veel sterker zal belasten dan een GES.

VOORBEELD

Stel dat bij een bepaalde gelijkstroominstelling van een transistor geldt $S = 50$ mA/V, terwijl $h_{fe} = 400$.

Dan is $\quad h_{ib} = \frac{1}{S} = \frac{1}{50.10^{-3}} = 20\ \Omega$

$$h_{ie} = h_{fe} \cdot \frac{1}{S} = 400\ .\ 20 = 8000\ \Omega.$$

De steilheid S is sterk afhankelijk van de gelijkstroominstelling. Dit betekent dat ook h_{ib} daarvan afhankelijk is.

Hoe groter de gelijkstroom, des te groter de steilheid en des te kleiner de ingangswisselstroomweerstand h_{ib}.

OEFENING

Bij een GES geldt $h_{ie} = 50$ kΩ, terwijl $h_{fe} = 400$.
Hoe groot zal h_{ib} zijn als men deze transistor bij dezelfde gelijkstroom-instelling in GBS toepast?

$h_{ib} =$ [ ]

GELIJK- EN WISSELSTROOMSCHEMA'S

In het begin van deze les hebben we gesteld dat de gelijkstroomschema's van de GES en de GBS nagenoeg hetzelfde zijn. De namen "GES" en "GBS" hebben dan ook vooral betrekking op de *wissel*stroomschema's die wel verschillen. Om dit duidelijk in te zien volgt nu een oefening.

OEFENING

Op volgend blad ziet u vier complete schema's; twee voor een GES en twee overeenkomstige voor een GBS.

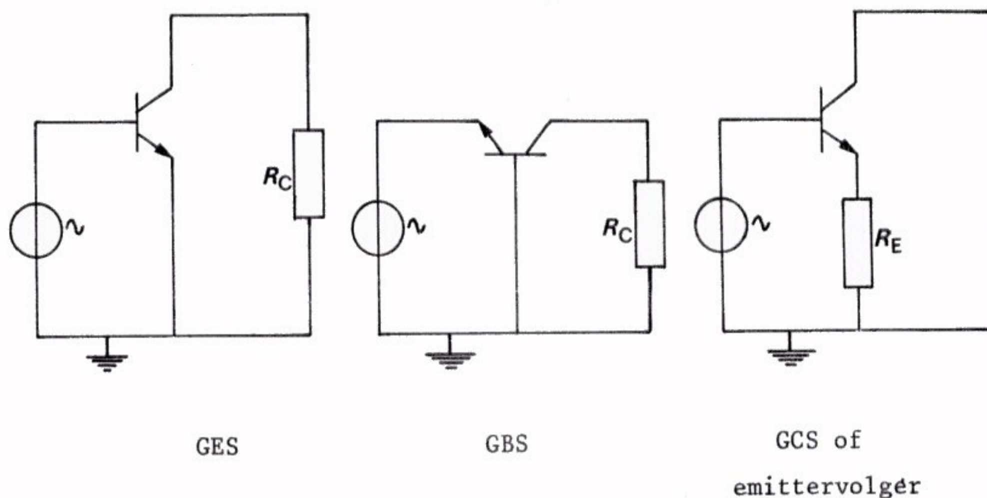
- Teken naast deze schema's het gelijk- en het wisselstroomschema.
- Vergelijk de gevonden schema's onderling. U ziet dat de gelijkstroomschema's grote overeenkomst vertonen en dat de wisselstroomschema's sterk verschillen.

complete schema	gelijkstroomschema	wisselstroomschema
+ R_B R_C u ~		
+ R_C R_B u ~		
+ R_1 R_C R_2 R u ~		
+ R_C R_1 R_E R_2 R u ~		

SAMENVATTING

- In principe zijn er drie versterkschakelingen met een transistor mogelijk:

wisselstroomschema's



GES GBS GCS of emittervolger

- Voor een transistor (allêên) in GES geldt:
  - een wisselstroomversterking: $A_i = h_{fe}$
  - een wisselspanningsversterking: $A_u = S.R_C$

    bij deze versterking treedt 180^0 faseverandering op
  - een wisselstroomvermogensversterking: $A_p = A_u.A_i$
  - een ingangswisselstroomweerstand: $h_{ie} = h_{fe} \cdot \frac{1}{S}$.

- Voor een transistor (allêên) in GBS geldt:
  - geen wisselstroomversterking: $A_i \approx 1$
  - een wisselspanningsversterking: $A_u = S.R_C$

    bij deze versterking treedt géén faseverandering op
  - een wisselstroomvermogensversterking: $A_p = A_u.A_i = A_u$
  - een *kleine* ingangswisselstroomweerstand: $h_{ib} = \frac{1}{S}$.

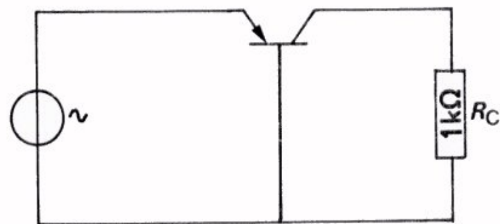
Opmerking: Bovenstaande formules gelden allêên als de daarbovenstaande wisselstroomschema's van toepassing zijn. In schakelingen, waarin meerdere componenten toegepast worden, zullen de versterkingsfactoren doorgaans kleiner zijn.

NAAM:

KLAS:

OEFENINGEN

In de GBS, waarvan hier het wisselstroomschema is gegeven, wordt een versterking A_u gemeten van 100.



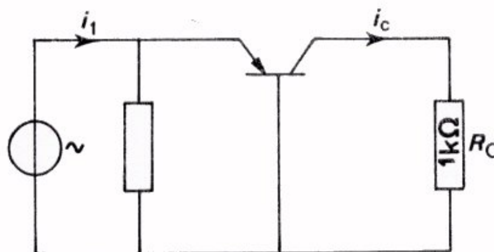
Hoe groot is de steilheid S?

S =

Hoe groot is de h_{ib}?

h_{ib} =

Als parallel aan de ingang een weerstand van 100 Ω wordt geplaatst, hoe groot wordt dan de ingangsweerstand van de *schakeling*?

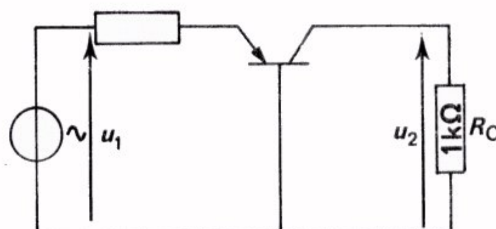


R_{ing} =

Hoe groot is dan de wisselstroomversterking van de schakeling $A_i = \frac{i_c}{i_1}$

A_i =

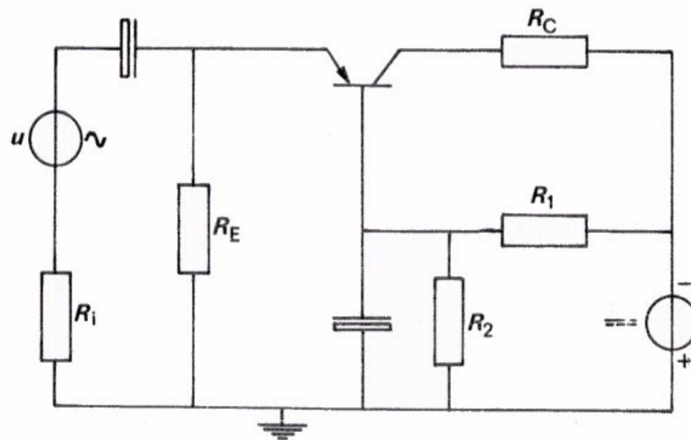
Als in serie met de emitterleiding een weerstand van 50 Ω wordt opgenomen, hoe groot is dan $R_{ing} = u_1/i_e$?



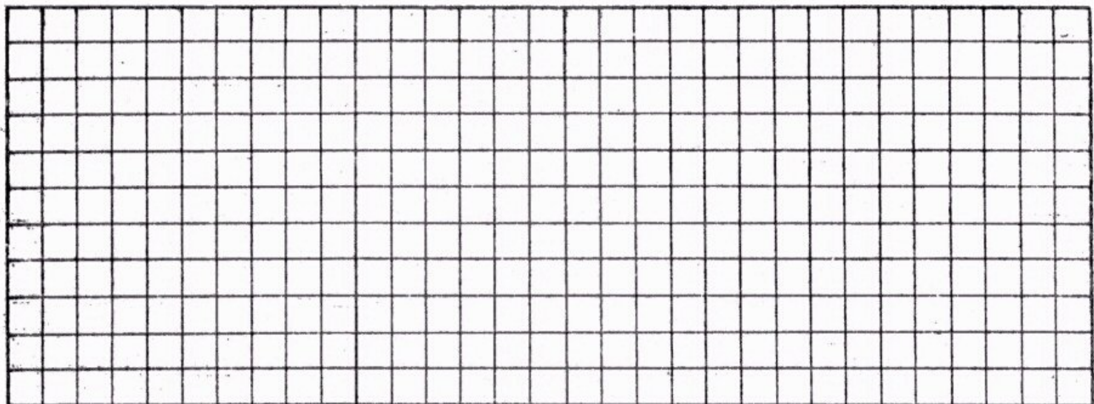
R_{ing} =

Hoe groot is in dit laatste geval de wisselspanningsversterking $A_u = \frac{u_2}{u_1}$?

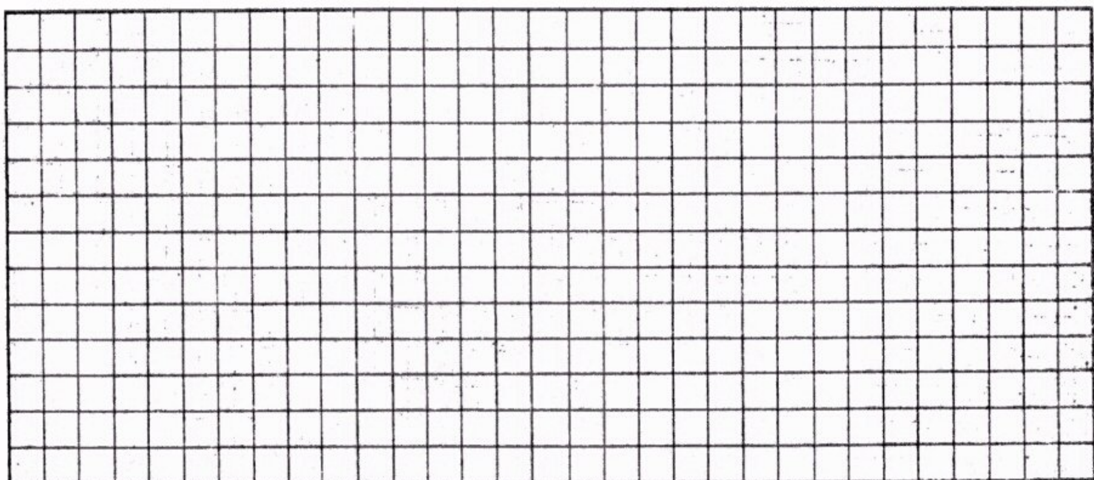
A_u =



Teken van de GBS apart het gelijkstroom- en het wisselstroomschema hieronder.
Vermeld telkens de weerstanden.



gelijkstroomschema



wisselstroomschema

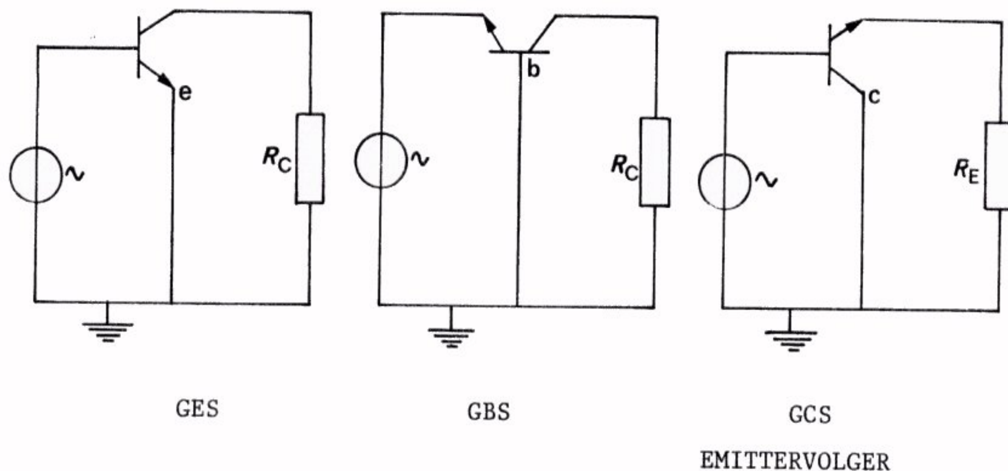
B 216

DE GCS OF EMITTERVOLGER

INLEIDING

Tot nu toe hebben we het uitvoerig gehad over de GES en in de vorige les over de GBS. In deze les komt de derde schakeling ter sprake: de GCS of *emittervolger*.

We geven hier de wisselstroomschema's van de drie grondschakeling nog eens naast elkaar.



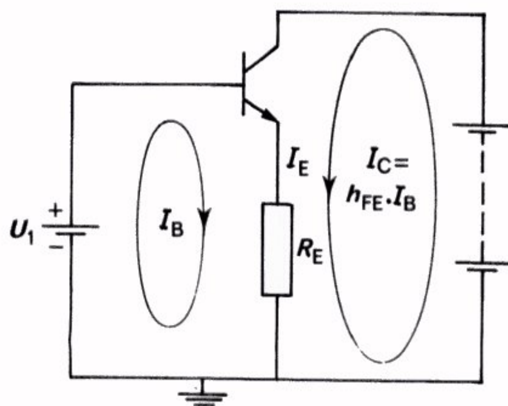
GES GBS GCS EMITTERVOLGER

Bij de GES ligt de emitter voor wisselspanning aan een gemeenschappelijk punt.

Bij de GBS ligt de basis voor wisselspanning aan een gemeenschappelijk punt.

Bij de GCS ligt de collector voor wisselstroom aan een gemeenschappelijk punt.

DE STROOMVERSTERKING VAN DE GCS



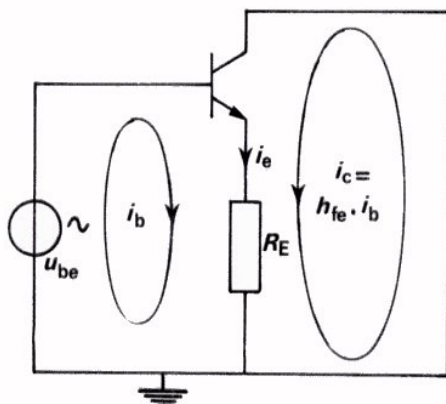
Hiernaast is een gelijkstroomschema van een GCS of emittervolger getekend. Om de werking gemakkelijk te overzien zijn twee voedingsbronnen aangebracht.

De diode tussen e en b is van een kleine doorlaatspanning voorzien. In het basiscircuit ontstaat een kleine stroom, die in het collectorcircuit een veel grotere stroom veroorzaakt.

Door de weerstand in de emitterleiding loopt I_B zowel als I_C.

$$I_E = I_B + I_C = I_B + h_{FE}\, I_B$$

$$I_E \approx h_{FE} \cdot I_B$$



Voeren we ook een wisselspanning u_{be} toe, dan gaan de wisselstromen i_b en $h_{fe} \cdot i_b$ lopen. Hiernaast is daarvoor het wisselstroomschema getekend.

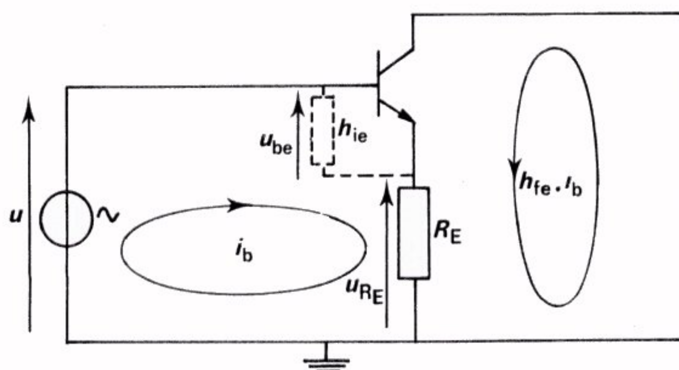
Door de emitterweerstand R_E loopt nu de versterkte wisselstroom

$$i_e \approx h_{fe} \cdot i_b.$$

Er vindt dus een wissel*stroom*versterking plaats die ongeveer gelijk is aan:

$$\boxed{A_i \approx h_{fe}}$$

DE SPANNINGSVERSTERKING VAN DE GCS



Hier ziet u nogmaals het wisselstroomschema van de emittervolger. Toegevoerd wordt de wisselspanning u. Over R_E wordt de wisselspanning afgenomen. De vraag die we nu kunnen stellen is: "Hoe groot is de wisselspanningsversterking van de GCS?"

De toegevoerde wisselspanning u is gelijk aan de som van:

- de spanning u_{be} over "de ingangswisselstroomweerstand h_{ie} van de transistor",
- de spanning over de emitterweerstand R_E.

De eerste spanning: $u_{be} = h_{ie} \cdot i_b$

en de tweede $u_{RE} \approx R_E \cdot h_{fe} \cdot i_b$.

Nu geldt bijna altijd dat $R_E \cdot h_{fe}$ veel groter is dan h_{ie}.

Dit wil zeggen dat:

$$u_{be} << U_{RE} \text{ en dus } u_{RE} \approx u.$$

De wisselspanningsversterking is dus ongeveer 1.

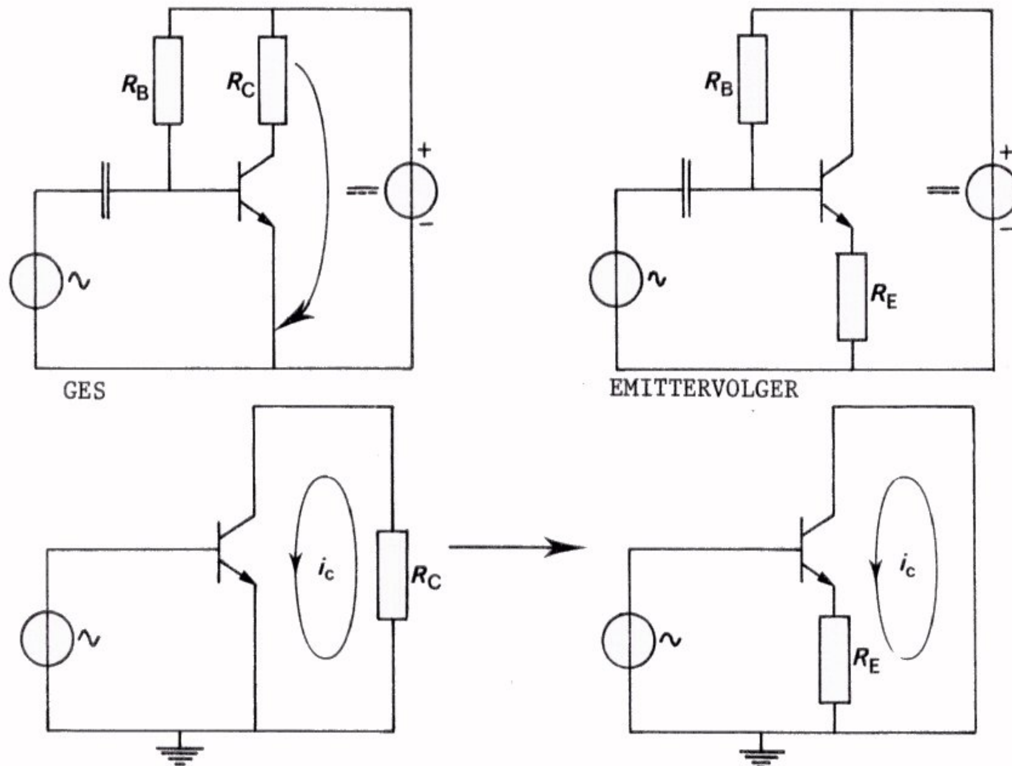
$$\boxed{A_u = \frac{u_{RE}}{u} \approx 1}$$

Er vindt dus geen wisselspanningsversterking plaats. Verder treedt er geen faseverandering op.

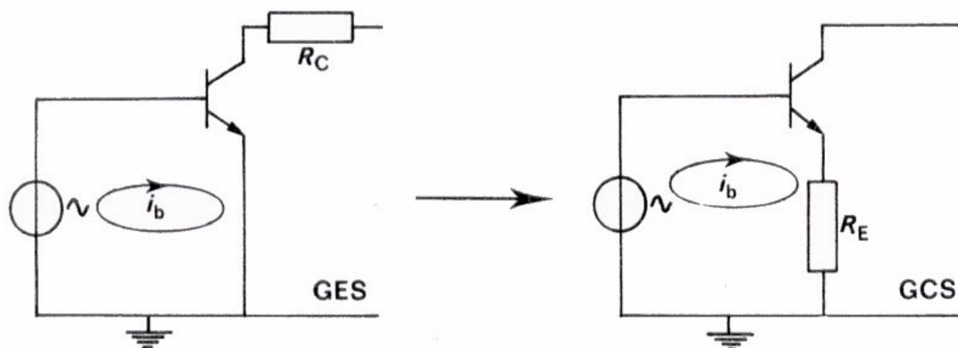
$$\boxed{u_{RE} \text{ is in fase met } u}$$

HET PRAKTISCHE SCHEMA

Men kan een praktische emittervolger met één voedingsbron uit een GES ontstaan denken door de R_C naar de emitterleiding te verplaatsen.



Uit bovenstaande schema's volgt dat er voor het *collectorcircuit* geen verschil optreedt als dezelfde R in de emitterleiding wordt gezet.

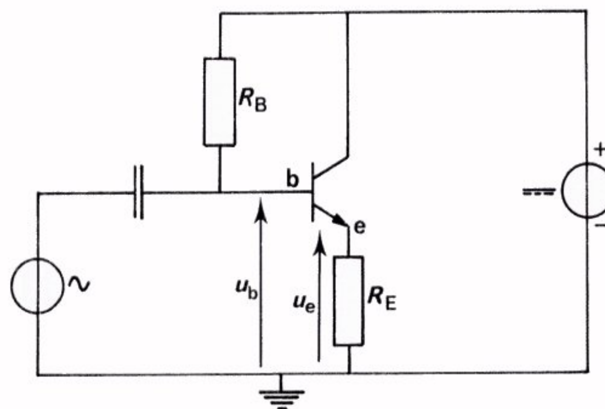


Voor het *basiscircuit* is er een groot verschil als dezelfde R niet meer in de collectorleiding, maar in de emitterleiding wordt opgenomen.

Bedenk wel dat over R_B in het schema linksboven, bijna de gehele voedingsspanning staat. Door R_C te verplaatsen naar de emitterleiding komt over R_E ook een deel (bijna de helft) van de gelijkspanning te staan. Om dezelfde gelijkstroom door de transistor te laten lopen, moet een kleinere R_B gekozen worden.

WAAROM DE NAAM "EMITTERVOLGER"?

Als vrijwel de gehele toegevoerde wisselspanning over R_E komt te staan, dan staat er blijkbaar bijna geen wisselspanning tussen b en e. Dit wil zeggen dat de wisselspanning van e ten opzichte van aarde steeds vrijwel gelijk is aan die van b ten opzichte van aarde. Neemt de spanning van b toe, dan wordt ook die van e groter. Met andere woorden: de emitter *volgt* steeds de spanning van de basis aan de ingang. Dit is de reden waarom men de GCS meestal *emittervolger* noemt.



emittervolger-schema met één voedingsbron

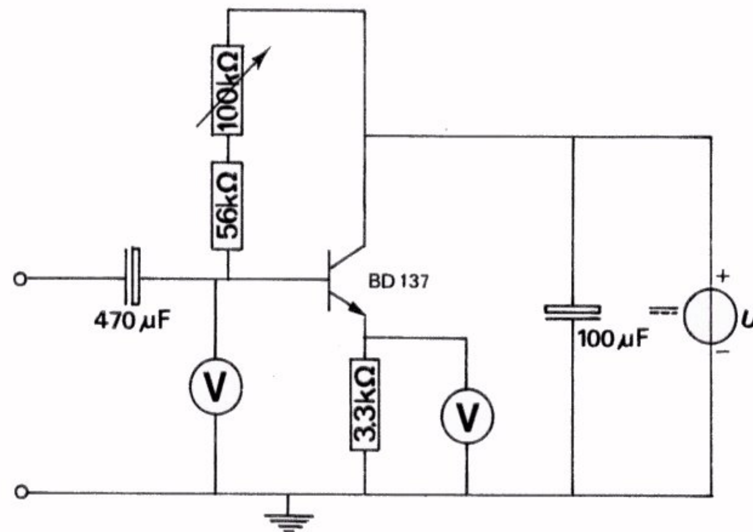
Opmerking:

Niet alleen de *wissel*spanning u_e volgt de *wissel*spanning u_b.
maar ook de *gelijk*spanning U_E volgt de *gelijk*spanning U_B.
Neemt bijvoorbeeld U_B 2 V toe, dan zal ook U_E 2 V toenemen.

De gelijkspanningen U_B en U_E zullen echter steeds ongeveer 0,7 V verschillen. Deze 0,7 V is de doorlaatspanning U_{BE} van de diode tussen b en e.

We gaan enkele metingen aan de emittervolger verrichten.

OPDRACHT: METEN AAN EEN EMITTERVOLGER



- Bouw deze schakeling.

- Sluit de universeelmeters aan in de 30 V ⎓ stand.

- Stel de spanning U in op 30 V.

- Varieer de basisweerstand. Let op de universeelmeters:

  U_B varieert tussen ______ en ______

  U_E varieert tussen ______ en ______

  de emitterspanning "volgt" steeds die van de basis, vandaar de naam emittervolger.

- Zet de spanning U op 15 V en maak R_B = 156 kΩ.

- Verwijder de universeelmeters.

- Sluit een *RC*-generator aan op de ingang.

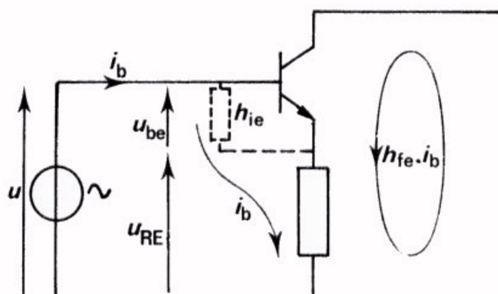
- Voer een wisselspanning toe met een amplitude van 4 V bij 1 kHz. Stel u_b in met behulp van de oscilloscoop; Y-AMPL. = 1 V/div.
  Trigger extern.

- Maak u_e zichtbaar met de oscilloscoop. U ziet dat $u_e \approx u_b$, zodat $A_u \approx 1$.
  Er heeft daarbij geen faseverandering plaats.

DE INGANGSWISSELSTROOMWEERSTAND VAN DE GCS

De ingangswisselstroomweerstand van een GCS bedraagt:

$$R_{ing} = \frac{u}{i_b} \approx h_{ie} + h_{fe}\, R_E$$



Deze formule is als volgt te bewijzen:

$$R_{ing} = \frac{u}{i_b} = \frac{u_{be} + U_{RE}}{i_b}$$

$$\approx \frac{h_{ie}.i_b + R_E(h_{fe}.i_b)}{b}$$

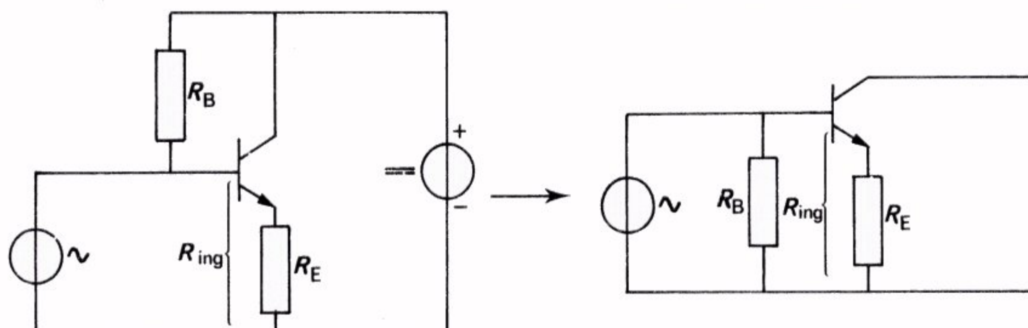
$$\approx h_{ie} + h_{fe}.R_E$$

In de praktijk is R_{ing} zeer groot.

Voorbeeld: $h_{ie} = 2$ kΩ
$R_E = 1$ kΩ
$h_{fe} = 600$

$R_{ing} \simeq 600$ kΩ (ga dit na)

OPMERKING

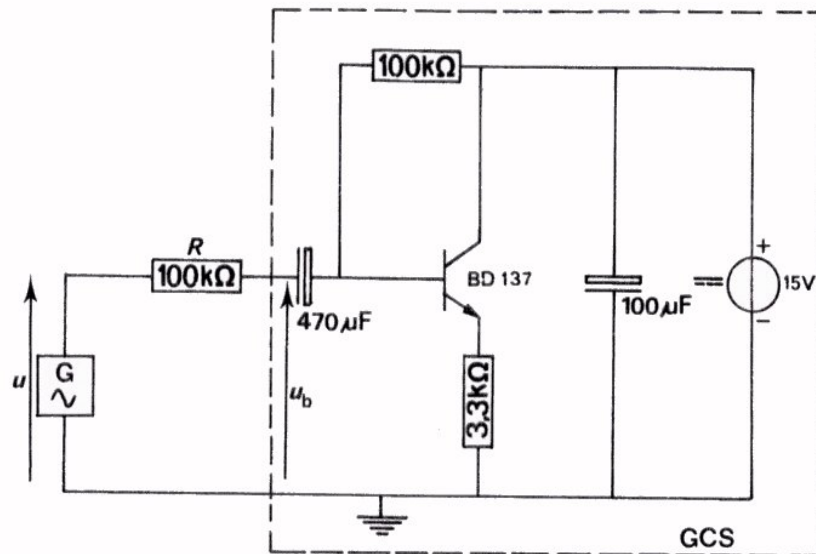


In de praktijk komt over R_E ongeveer de helft van de voedingsspanning te staan. U_{RE} heeft dan de grootst mogelijke variatieruimte, namelijk van 0 tot $U_{voeding}$. Over R_B staat eveneens ongeveer de halve voedingsspanning. Dus $I_B\ .\ R_B \approx h_{FE}\ .\ I_B\ .\ R_E$.

Dit levert een mooie vuistregel voor de berekening van R_B, namelijk $R_B = h_{FE}\ .\ R_E$.

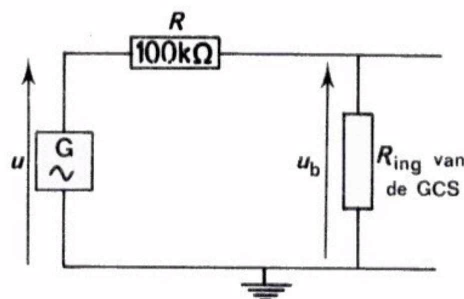
In het wisselstroomschema staat R_B parallel aan R_{ing}, die ongeveer gelijk is aan $h_{FE}\ .\ R_E$. De wisselstroomingangsweerstand van de schakeling is in dit geval gelijk aan $\frac{1}{2}\, R_B$.

OPDRACHT: METEN VAN R_{ing} VAN EEN GCS



- Bouw bovenstaande schakeling.

- We gaan R_{ing} meten en zorgen ervoor, dat tijdens de meting met de oscilloscoop deze steeds aan één kant geaard kan blijven. We kunnen dit bereiken door aan de ingang R = 100 kΩ in serie te schakelen en dan u en u_b te meten.



We hebben dan in principe naaststaand wisselstroomschema.

- Voer een wisselspanning u met f = 100 Hz en U_t = 4 V toe.

- Meet met behulp van de oscilloscoop u en u_b.

U_t = 4 V en U_{bt} = [V]

- De spanning over R = 100 kΩ is dus:

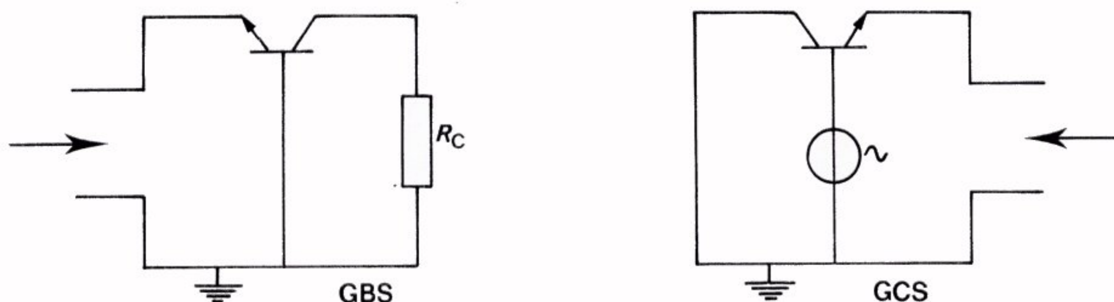
U_{rt} = [V]

- Hieruit volgt: $I_{it} = \frac{U_{rt}}{R}$ = [ ]

- Tenslotte: R_{ing} = [ ]

DE UITGANGSWISSELSTROOMWEERSTAND VAN EEN EMITTERVOLGER

De weerstand die men naar een schakeling "terugkijkend" ziet noemt men de *uitgangsweerstand* van deze schakeling.
Als men aan de *uit*gang van een emittervolger "terugkijkt", ziet men dezelfde wisselstroomschakeling als aan de *in*gang van een GBS. In volgende schema's is dit duidelijk te zien.



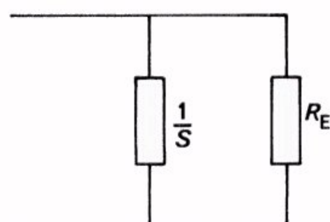
De uitgangswisselstroomweerstand van de GCS is dan ook even groot als de ingangswisselstroomweerstand van de GBS. Nu hebben we in les B215 gezien dat de ingangswisselstroomweerstand van de GBS gelijk is aan $\frac{1}{S}$.
Dit is als regel een zeer kleine waarde.

De konklusie luidt dus, dat de uitgangswisselstroomweerstand R_{uit} van de emittervolger in het algemeen ook zeer klein is en gelijk aan $\frac{1}{S}$.

Samenvattend kan men dus van de GCS zeggen, dat de *in*gangsweerstand *groot* en de *uit*gangsweerstand *klein* is.

OPMERKING

Aan de uitgang van de GCS bevindt zich parallel aan de uitgangswisselstroomweerstand $\frac{1}{S}$ ook nog de emitterweerstand R_E.
De uitgangswisselstroomweerstand is dus precies gelijk aan:



$$R_{uit} = \frac{\frac{1}{S} \cdot R_E}{\frac{1}{S} + R_E}.$$

In een praktische schakeling is bijna altijd $\frac{1}{S}$ veel kleiner dan R_E, zodat $R_{uit} \approx \frac{1}{S}$.

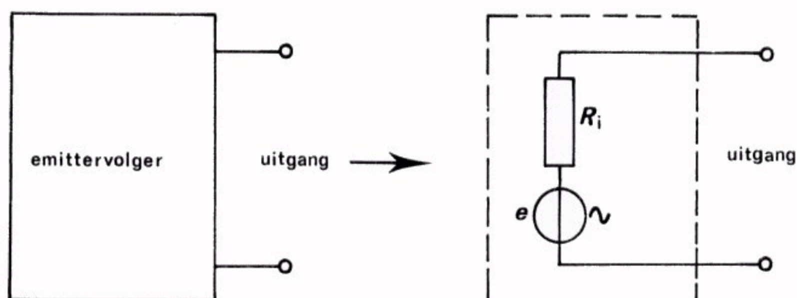
VERGELIJKING VAN ENKELE GROOTHEDEN BIJ DE DRIE GRONDSCHAKELINGEN

We hebben de transistor in GES, GBS en GCS behandeld. Terwille van de overzichtelijkheid geven we hieronder een samenvatting van de verschillende grootheden. Bestudeer deze goed.

	GES	GBS	GCS
wisselstroom-versterking A_i	h_{fe}	≈ 1	$\approx h_{fe}$
wisselspannings-versterking A_u	SR_C (180^0 fase-verandering)	SR_C (geen fase-verandering)	≈ 1 (geen fase-verandering)
ingangswissel-stroomweerstand R_{ing}	$h_{ie} = h_{fe} \cdot \frac{1}{S}$	(klein) $h_{ib} \approx \frac{1}{S}$	(groot) $h_{ie} + h_{fe} \cdot R_E$ ($h_{ie} = h_{fe} \cdot \frac{1}{S}$)
uitgangswissel-stroomweerstand R_{uit}			(klein) $\approx \frac{1}{S}$

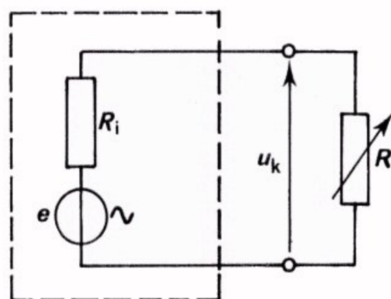
HET METEN VAN DE UITGANGSWISSELSTROOMWEERSTAND VAN EEN EMITTERVOLGER

Aan de uitgang van een emittervolger "zien" we een wisselspanningsbron met EMK e en inwendige weerstand R_i.



De R_i is de uitgangswisselstroomweerstand R_{uit} van de GCS.

De R_i is te meten door de emittervolger met een variabele R te belasten en te zorgen dat de klemspanning u_k gelijk is aan ½ e. Dan is $R_i = R$.



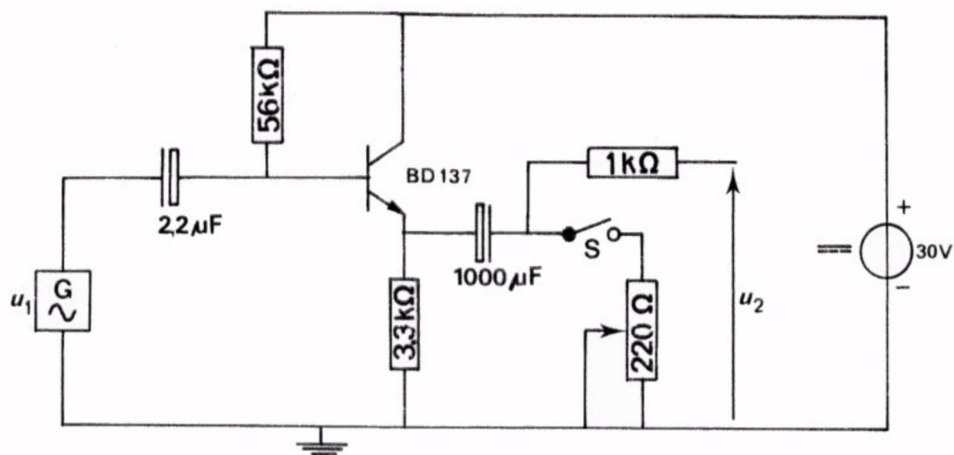
Als $u_k = \frac{1}{2}$ e,

is $R_i = R$.

Door tenslotte de weerstand R los te maken uit de schakeling en zijn waarde met een ohmmeter te meten is $R_i = R$ te bepalen.

In volgende opdracht gaan we dit doen.

OPDRACHT: METEN VAN R_{uit} VAN EEN GCS



- Bouw deze schakeling op het oefenpaneel.
- Laat S eerst open.
- Voer een wisselspanning u_1 toe van 1 kHz. Maak u_2 op het scherm van de oscilloscoop zichtbaar. Zorg dat U_{2_t} = 100 mV.

  De oscilloscoop wordt aangesloten via een weerstand van 1 kΩ. Dit is nodig om storende invloed van de oscilloscoop op de schakeling te voorkomen.

- Sluit S en regel de potentiometer zó, dat U_{2_t} = 50 mV.
  Nu is dus $u_k = \frac{1}{2}$ e, (zie vorig blad).
- Open S en meet de weerstand van de potentiometer.

  U vindt: R_{uit} = [ ]

CONCLUSIE

R_{uit} van een GCS is zeer klein.

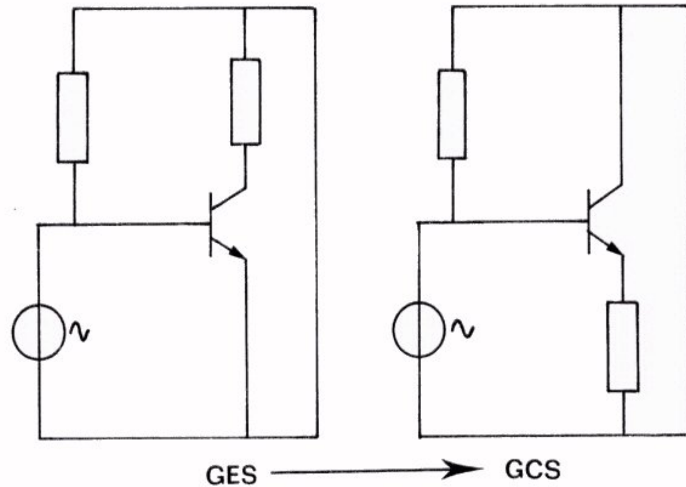
OPMERKING

Deze meting is in principe altijd juist. In de praktijk echter kan een probleem ontstaan als de transistor voldoende stroom kan leveren aan de kleine belastingsweerstand. De transistor "loopt dan vast".

SAMENVATTING

- De *emittervolger* is uit een GES ontstaan te denken door de weerstand van de collectorleiding over te brengen naar de emitterleiding.

Wisselstroomschema's



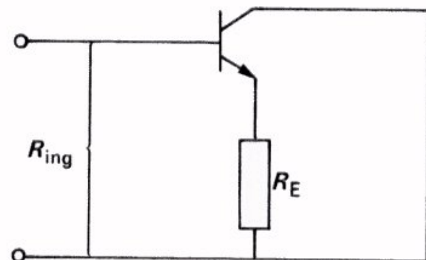
- De emittervolger dankt zijn naam aan het feit, dat spanningsveranderingen van de *basis* direct worden gevolgd door even grote spanningsveranderingen van de *emitter*.

Als U_B b.v. 3 V toeneemt, neemt ook U_E 3 V toe.

- Eigenschappen van de emittervolger:

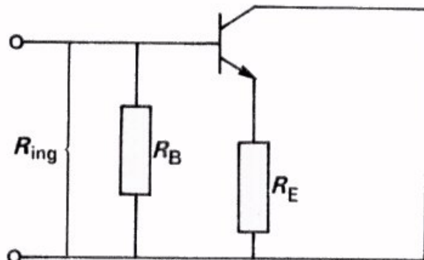
  - De wisselstroomversterking van de emittervolger alleen bedraagt: $A_i \approx h_{fe}$.
  - In een praktische schakeling gaat een deel van de ingangswisselstroom door R_B. Als $R_B \approx R_{ing}$ geldt $A_i \approx \frac{1}{2}\, h_{FE}$.
  - De wisselspanningsversterking $A_u \approx 1$.
  - Er vindt geen faseverandering plaats.
  - De vermogensversterking $A_P = A_i . A_u \approx A_i \approx h_{fe}$. In een praktische schakeling dus $A_P \approx \frac{1}{2}\, h_{FE}$.
  - De ingangswisselstroomweerstand is *groot* en gelijk aan:

$$R_{ing} \approx h_{ie} + h_{fe} \cdot R_E$$



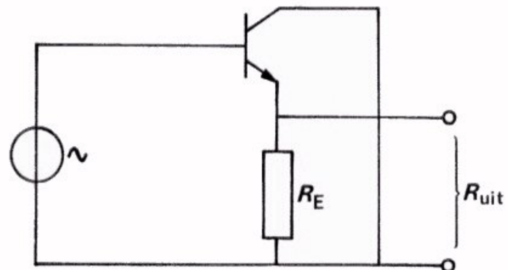
  - Als er een R_B aanwezig is en de transistor "in het midden" is ingesteld, geldt:

$$\text{Totale } R_{ing} \approx \frac{R_B \cdot R_{ing}}{R_B + R_{ing}} \approx \frac{1}{2}\, R_B$$



  - De uitgangswisselstroomweerstand is *klein* en gelijk aan:

$$R_{uit} = \frac{R_E \cdot \frac{1}{S}}{R_E + \frac{1}{S}} \approx \frac{1}{S}$$



NAAM:

KLAS:

1.

180kΩ

1,2kΩ

Bereken precies de ingangsweerstand van de schakeling.

h_{ie} = 3 kΩ
h_{fe} = 150

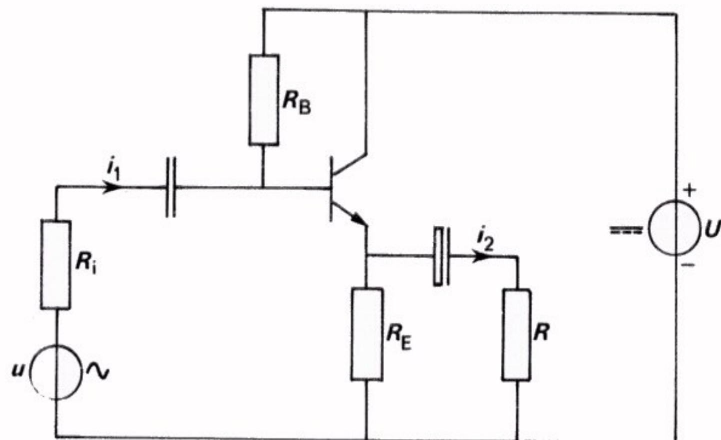
Denk aan de invloed van R_B en h_{ie}.

Bereken ook de uitgangsweerstand.

R_{ing} = kΩ
R_{uit} = Ω

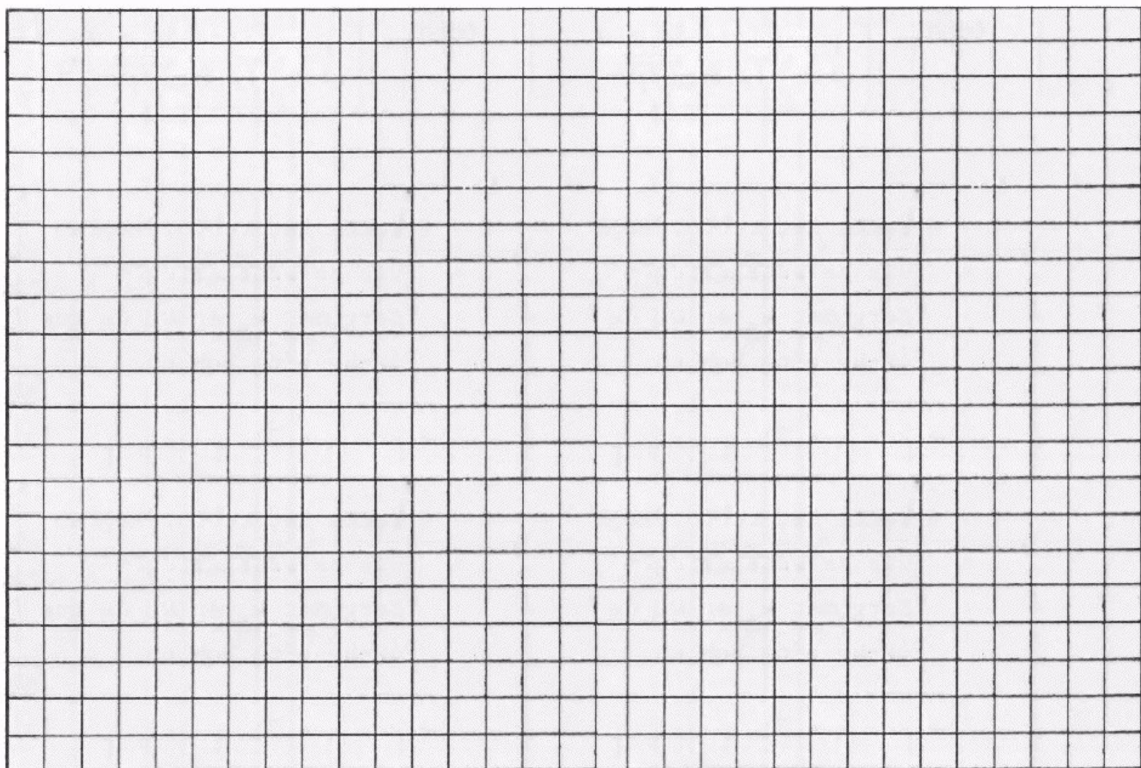
2.

Teken hieronder het gelijk- en het wisselstroomschema van de schakeling.



Hoe groot is $A_i = \frac{i_2}{i_1}$ als $h_{fe} = 400$ en $R = R_E = R_B$?

A_i =

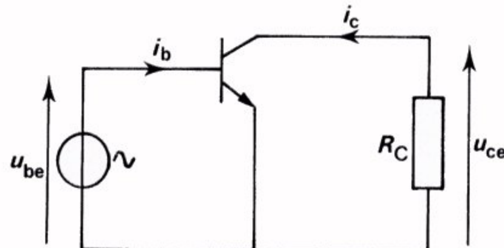


B 217

DE DRIE GRONDSCHAKELINGEN

In deze les zetten we de eigenschappen van de drie grondschakelingen nog eens bij elkaar. Bovendien gaan we ze onderling vergelijken.

- *De gemeenschappelijke emitterschakeling*



wisselspanningsversterking:

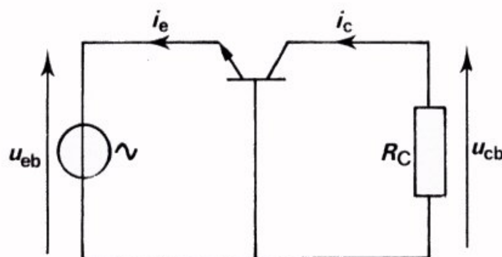
$$A_u = \frac{u_{ce}}{u_{be}} = S \cdot R_C$$

180^0 faseverandering

wisselstroomversterking:

$$A_i = \frac{i_c}{i_b} = h_{fe}$$

- *De gemeenschappelijke basisschakeling*



wisselspanningsversterking:

$$A_u = \frac{u_{cb}}{u_{eb}} = S \cdot R_C$$

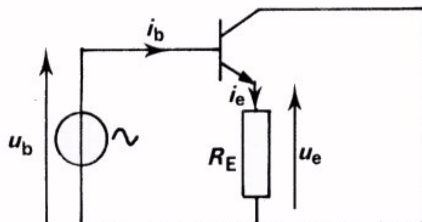
geen faseverandering

wisselstroomversterking:

$$A_i = \frac{i_c}{i_e} \approx 1$$

want $i_c \approx i_e$.

- *De gemeenschappelijke collectorschakeling of emittervolger*



wisselspanningsversterking:

$$A_u = \frac{u_e}{u_b} \approx 1$$

geen faseverandering

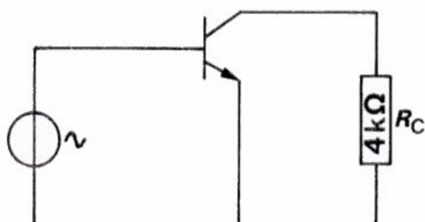
wisselstroomversterking:

$$A_i = \frac{i_e}{i_b} \approx h_{fe}$$

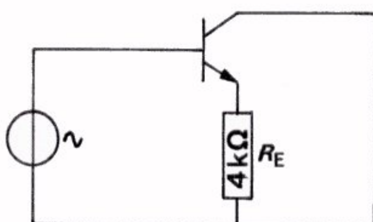
OEFENING

Een transistor heeft steeds dezelfde gelijkstroominstelling. Verder geldt: h_{fe} = 600 en S = 150 mA/V.

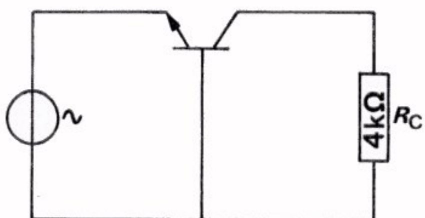
Bereken in volgende gevallen de vermogensversterking A_P.



A_P = ☐

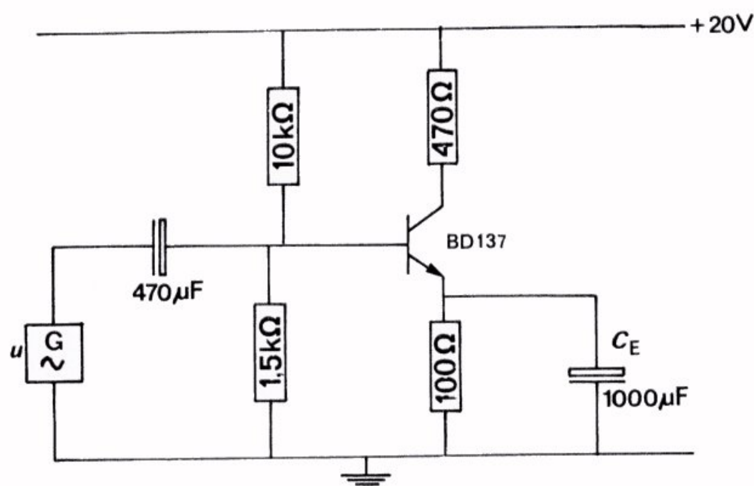


A_P = ☐



A_P = ☐

OPDRACHT: METEN AAN EEN GES



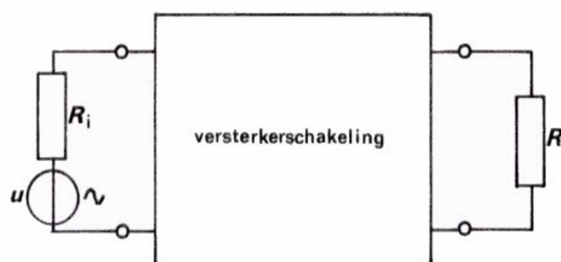
- Bouw deze schakeling.
  Voer nog geen wisselspanning toe.
- Meet I_C, I_B, U_{BE} en U_{CE}.

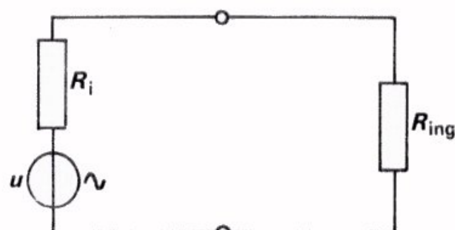
I_C =	mA	U_{BE} =	mV
I_B =	μA	U_{CE} =	V

- Verwijder de aangebrachte universeelmeter.
- Meet met behulp van een generator en een oscilloscoop de wisselspanningsversterking bij 1 kHz. A_u =
- Hoe groot zal A_u zijn als C_E wordt verwijderd?

  $A_u \approx$
- Meet A_u nu zonder C_E. A_u =

DE INGANGSWEERSTAND



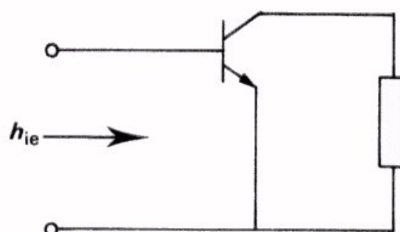


Een schakeling vormt een belasting voor de spanningsbron waarop hij is aangesloten.
De spanningsbron wordt dan belast met de *ingangsweerstand* R_{ing} van de schakeling.
Voor de verschillende grondschakelingen loopt de R_{ing} nogal uiteen.

- Voor een GES:

$$R_{ing} = h_{ie} = h_{fe} \cdot \frac{1}{S}$$

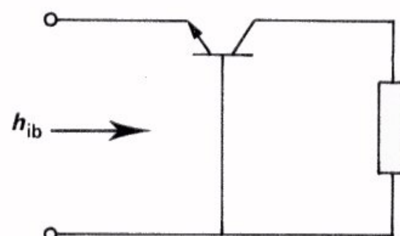
S is afhankelijk van de gelijkstroominstelling, dus R_{ing} ook.



- Voor een GBS:

$$R_{ing} = h_{ib} = \frac{1}{S}$$

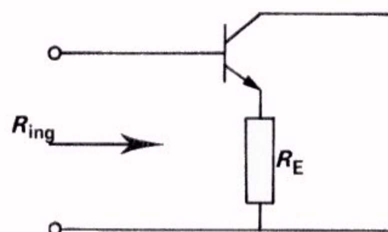
h_{ib} is *klein* en afhankelijk van de gelijkstroominstelling.



- Voor een GCS:

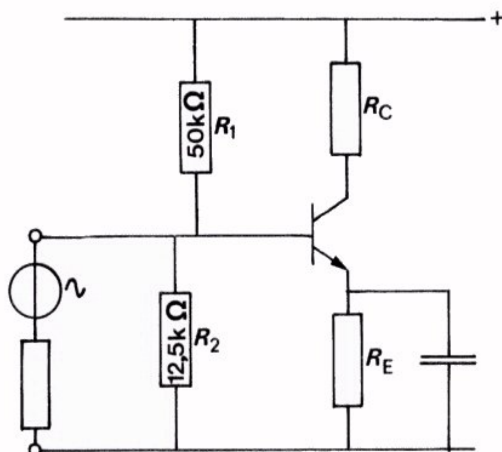
$$R_{ing} \approx h_{ie} + h_{fe}.R_E \approx h_{fe}.R_E$$

Over het algemeen is R_{ing} *groot* en vrijwel onafhankelijk van de gelijkstroominstelling.



OEFENINGEN

1.



In deze schakeling is:

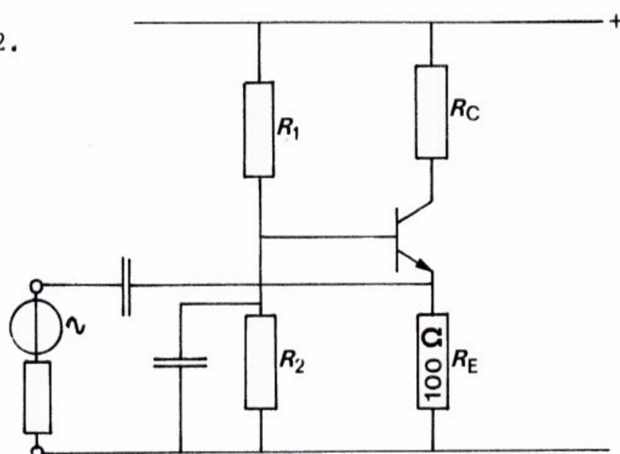
h_{ie} = 2 kΩ

Teken het wisselstroomschema.

Bereken de ingangswisselstroomweerstand van de schakeling.

R_{ing} =

2.



In deze schakeling:

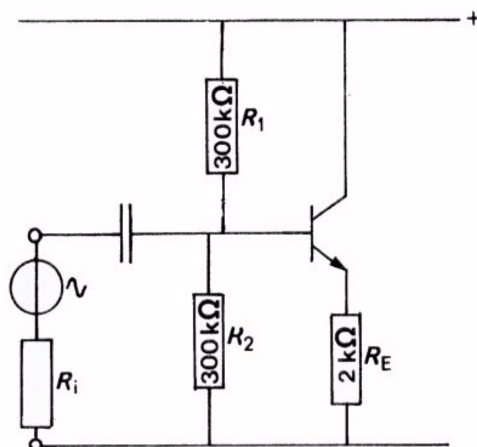
S = 100 mA/V

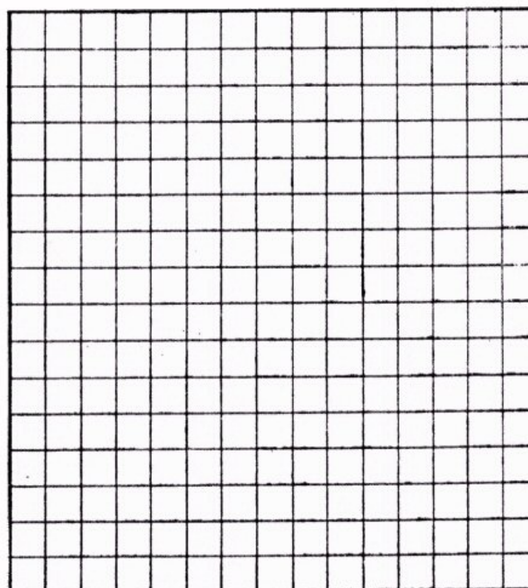
Teken het wisselstroomschema.

Bereken de ingangswisselstroomweerstand van de schakeling.

$R_{ing} \approx$

3. In deze schakeling, h_{ie} = 2,5 kΩ en h_{fe} = 800.
Teken het wisselstroomschema.

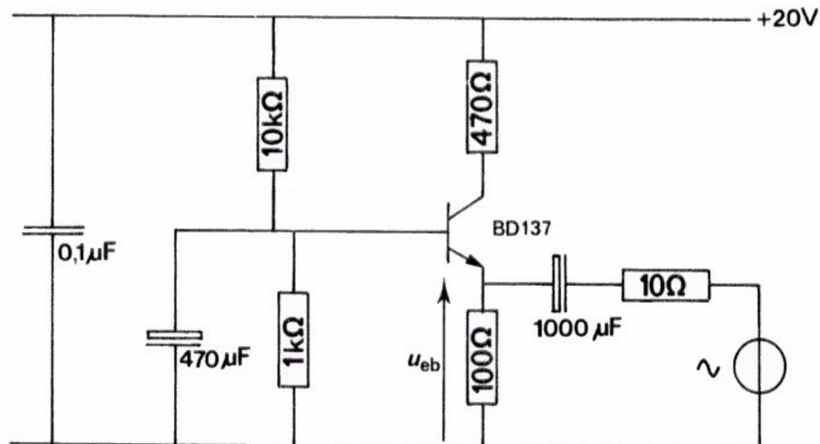




Bereken R_{ing} van de schakeling.

$R_{ing} \approx$

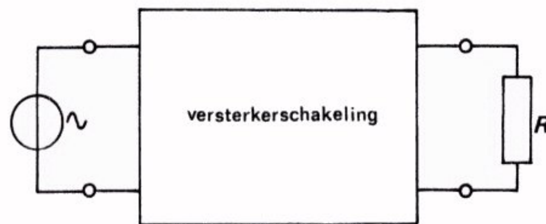
OPDRACHT: METEN AAN EEN GBS



- Bouw deze schakeling.
  Schakel de *LF*-generator nog niet in.
- Meet U_{EB} en U_{CB}. U_{EB} = ☐
  U_{CB} = ☐
- Meet met de oscilloscoop bij 1 kHz.
  $A_u = \frac{u_{cb}}{u_{eb}}$. Houd hierbij $U_{(eb)t}$ = 10 mV. ☐
- Meet de ingangswisselstroomweerstand tussen emitter en aarde.
  R_{ing} = ☐

Opmerking:
De condensator van 0,1 µF is nodig om storingen te voorkomen. De condensator van 470 µF sluit de basis met aarde kort voor wisselstroom

DE UITGANGSWISSELSTROOMWEERSTAND



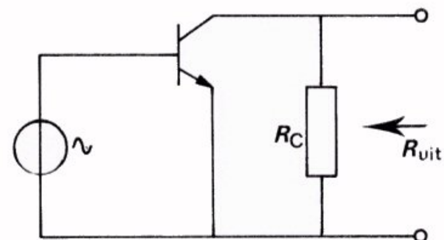
Een versterkschakeling voert het versterkte signaal toe aan een belastingsweerstand R. "Terugkijkend" in de schakeling "ziet" deze belastingsweerstand de *uitgangsweerstand* R_{uit}.

- Bij een GES:

Uitgangsweerstand:

$$R_{uit} = R_C$$

De invloed van de transistor is hier vrijwel te verwaarlozen.

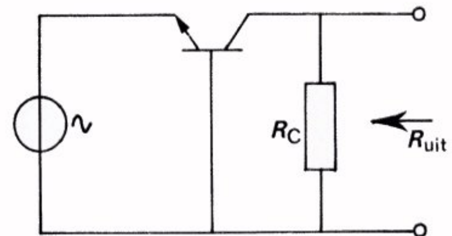


- Bij een GBS:

Uitgangsweerstand:

$$R_{uit} = R_C$$

Ook hier is de invloed van de transistor te verwaarlozen.

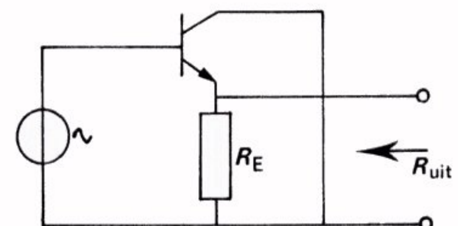


- Bij een GCS:

Uitgangsweerstand:

$$R_{uit} \approx \frac{1}{S}$$

Deze weerstand is zeer *klein*. R_{uit} is afhankelijk van S en dus van de gelijkstroominstelling.

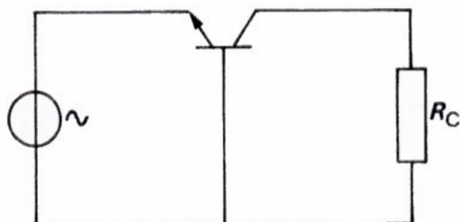


Voor sommige toepassingen is een kleine uitgangsweerstand gewenst. De *LF*-generator die we steeds gebruiken heeft b.v. ook een uitgang met lage R_i.

OEFENINGEN

Neem bij volgende oefeningen aan dat de *gelijkstroom*instelling niet verandert.

1.

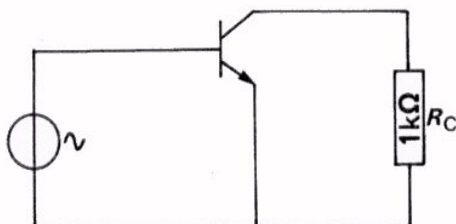


Als men aan R_C een weerstand van 600 Ω parallel schakelt vermindert de u_{cb} met 50%.

Hoe groot is R_C?

R_C =

2.

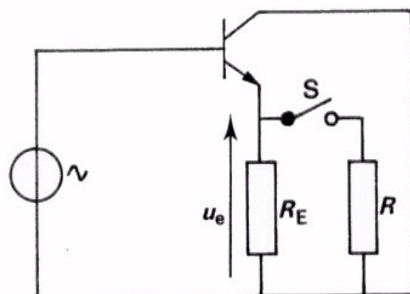


Als men aan R_C een weerstand R parallel schakelt vermindert de u_{ce} met 20%.

Hoe groot is R?

R =

3.



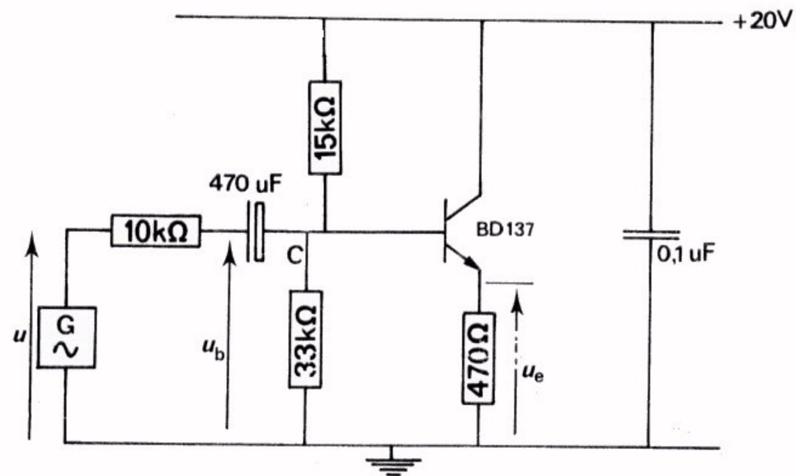
R_E = 1 kΩ
S = 100 mA/V

Door het sluiten van S zakt u_e tot op de helft.

Hoe groot is R?

R =

OPDRACHT: METEN AAN EEN EMITTERVOLGER



- Bouw deze schakeling.

- Meet U_{BE} en U_{CE}.

  U_{BE} =

  U_{CE} =

- Meet $A_u = \frac{u_e}{u_b}$ met behulp van een generator en een oscilloscoop bij 1 kHz.

  A_u =

- Meet de R_{ing} tussen b en aarde.

  R_{ing} =

SAMENVATTING

In onderstaande tabel zijn de voornaamste eigenschappen en formules van de drie grondschakelingen bij elkaar gezet.

	GES	GBS	GCS
	R_C	R_C	R_E
wisselstroom-versterking A_i	h_{fe}	≈ 1	$\approx h_{fe}$
Wisselspannings-versterking A_u	SR_C (180^0 fase-verandering)	SR_C (geen fase-verandering)	≈ 1 (geen fase-verandering)
ingangswissel-stroomweerstand R_{ing}	$h_{ie} = h_{fe} \cdot \frac{1}{S}$	$h_{ib} \approx \frac{1}{S}$ (klein)	$h_{ie} + h_{fe} \cdot R_E$ (groot)
uitgangswissel-stroomweerstand R_{uit}	R_C	R_C	$\approx \frac{1}{S}$ (klein)

NAAM: 　　　　　　　　　　KLAS:

OEFENINGEN

1. Teken hieronder naast elkaar de drie (wisselstroom-) principeschema's die met een NPN-transistor mogelijk zijn.

- Stel h_{fe} = 500, S = 250 mA/V en voedingsspanning = 10 V.
- Als voor elke schakeling de instelgelijkstroom I_C gelijk is aan 2 mA, hoe groot is dan bij elk de maximaal toelaatbare i_b?

$I_{b\ max}$ =

- Hoe groot is in de GES de optimale R_C, als U_{CE} tijdens het verwerken van de wisselstroom niet kleiner mag worden dan 0,4 V?

$R_{C\ optimaal}$ =

- Kies de weerstand uit de E-12 reeks die U als R_C of R_E zult gebruiken. U mag aannemen dat in de E-12 reeks 5% weerstanden beschikbaar zijn. Deze waarde houdt u dan aan voor elk van de drie schakelingen.

R_C = 　　　　 = R_E.

- Bereken nu voor elke schakeling A_i, A_u en A_P.

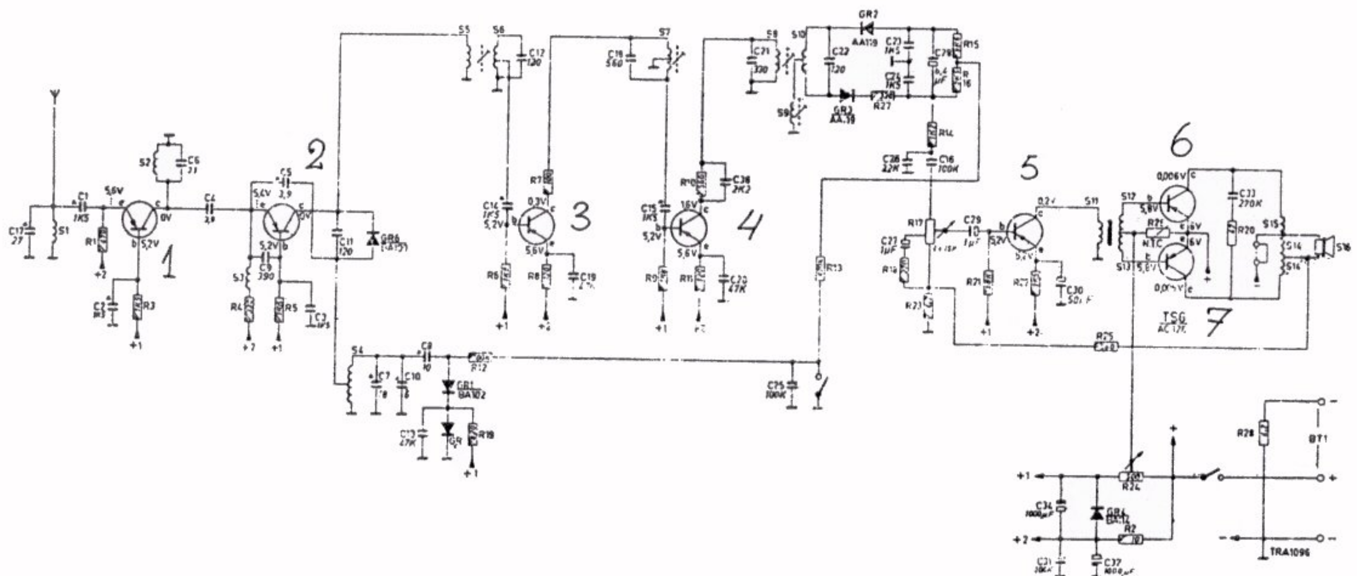
G ... S A_i = 　　 A_u = 　　 A_P =

G ... S A_i = 　　 A_u = 　　 A_P =

G ... S A_i = 　　 A_u = 　　 A_P =

2. In dit schema van een radio-ontvanger komen 7 transistors voor.
Geef van elke transistor aan in welke grondschakeling hij gebruikt wordt
en wat voor soort transistor het is (PNP of NPN).

1.			5.		
2.			6.		
3.			7.		
4.					



B 218

SCHAKELEN MET TRANSISTOR EN DIODE

INLEIDING

In de elektrotechniek komt het vaak voor dat men stroom of spanning moet in- of uitschakelen. Dit kan men doen met *mechanische* schakelaars, zoals b.v. de lichtnetschakelaars waarmee men lampen aan- en uitschakelt.
Het kan ook met *elektronisch* werkende schakelaars. In deze les zullen we zien hoe men transistors en dioden als elektronische schakelaars kan gebruiken.

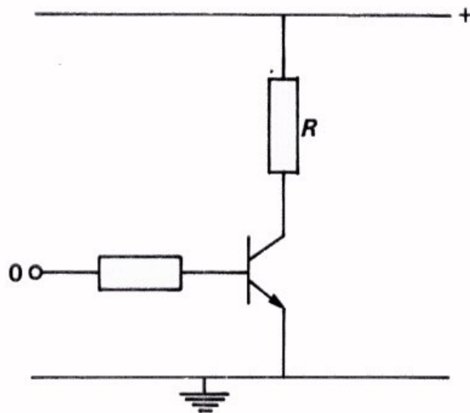
VOORDELEN VAN ELEKTRONISCHE SCHAKELAARS

Elektronische schakelaars hebben een aantal voordelen boven mechanische.
De elektronische schakelaar:

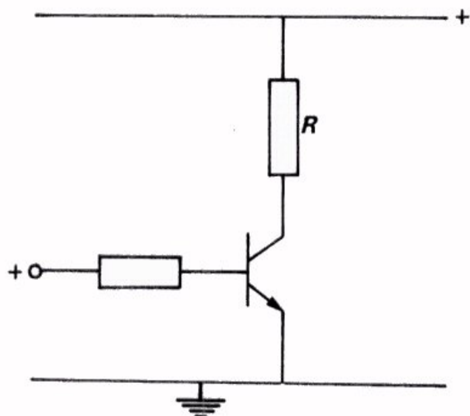
- neemt weinig plaats in
  Men kan vele dioden of transistors die als schakelaar dienst doen op een zeer klein stukje silicium, b.v. 1 mm^2, aanbrengen.
- is niet aan slijtage onderhevig
- kan veel sneller schakelen
- heeft om te schakelen maar zeer weinig energie nodig.

DE TRANSISTOR ALS SCHAKELAAR

De transistor in GES wordt vaak als schakelaar toegepast. Deze schakelaar wordt daarbij bediend door er al dan niet een gelijkspanning aan toe te voeren. Soms past men de transistor in GCS toe.



Voert men aan de ingang van deze transistor *geen* spanning toe, dan loopt er ook door de weerstand *R* geen stroom.
Bij toevoer van een spanning 0 staat de transistor in de *niet geleidende* toestand.



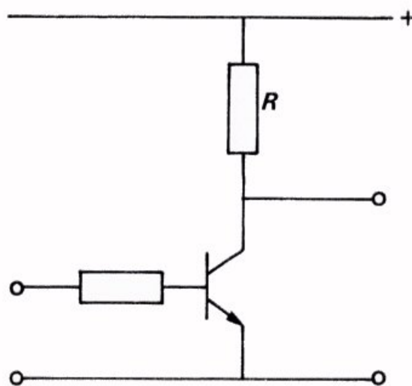
Voert men aan de ingang van de transistor *wel* een (positieve in geval van NPN) spanning toe, dan loopt er door de weerstand *R* wel een stroom.
Bij toevoer van een + spanning staat de transistor in de *geleidende* toestand.

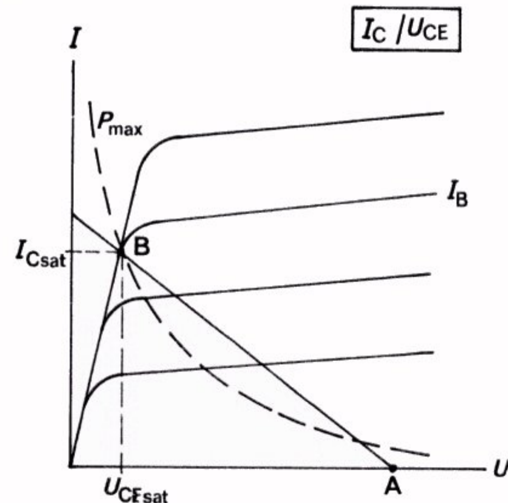
Op deze manier wordt het duidelijk dat we met een transistor kunnen schakelen.

- Bij een drukknopschakelaar van een huisbel zijn twee toestanden:
  - Niet met de vinger drukken; de bel gaat niet.
  - Wel drukken; de bel gaat over.
- Bij een transistorschakelaar zijn ook twee toestanden:
  - Spanning 0 op de basis; geen spanning over de collectorweerstand.
  - Spanning + op de basis in geval van NPN; wel spanning over de collectorweerstand.

Schakelingen die een aantal vaste toestanden kunnen aannemen noemen we *digitale* schakelingen. Twee-standen schakelingen, zoals hierboven genoemd, zijn dus ook digitale schakelingen.

SCHAKELEN MET EEN TRANSISTOR EN DE BELASTINGLIJN





In dit schema is nogmaals een transistor GES weergegeven. Rechts ziet u de bundel uitgangskarakteristieken met daarin de belastinglijn voor een bepaalde collectorweerstand R.

Op het vorig blad zagen we dat de transistor in de niet geleidende toestand verkeert bij spanning 0 op de basis. Deze toestand wordt in de grafiek weergegeven door het punt A. Er is wel een bepaalde voedingsspanning, maar geen stroom I_C door de weerstand R, omdat I_B immers 0 is.

De geleidende toestand krijgen we door aan de basis een + spanning toe te voeren. Deze toestand wordt in de grafiek aangegeven door punt B.

Waarom juist door B en niet een van de vele andere punten op de belastinglijn?

In een transistor die stroom trekt wordt een vermogen omgezet in warmte. Dit vermogen kan als het te groot wordt de transistor kapot maken. In bovenstaande I_C-U_{CE} karakteristiek is een P_{max}-lijn geschetst. Deze lijn geeft de grens aan van het toegestane vermogen dat in de transistor gedissipeerd mag worden. Voor elke spanning U_{CE} is er een bijpassende maximaal toegestane collectorstroom. De lijn die punt A met punt B verbindt is de weerstandslijn van de collectorweerstand R. Om de transistor heel te houden moeten we zorgen dat de stroom klein is als de spanning groot is, of dat de spanning klein is als de stroom groot is. Aan de gestelde eisen wordt voldaan als we de transistor van A naar B of van B naar A zó snel schakelen dat het vermogen gedurende het omschakelen niet boven de gestelde grens uitkomt. De kleinste spanning U_{CE} bij de bocht of knie van de uitgangskarakteristiek noemt men de *kniespanning*.

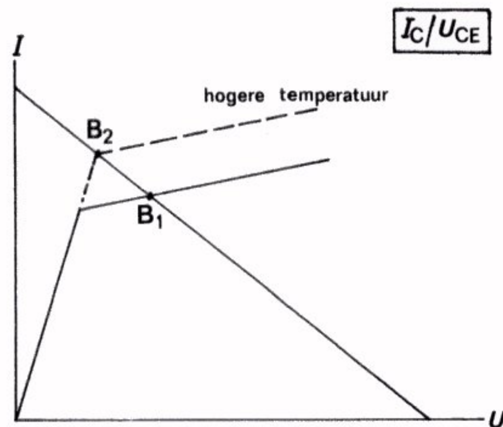
Zit men geheel aan de linkerkant van de karakteristiekenbundel, dan spreekt men van "in *verzadiging* sturen". De kniespanning noemt men dan ook wel *verzadigingsspanning*, (engels: "saturation", vandaar $U_{CE\ sat}$). De bijbehorende stroom is de *verzadigingsstroom* $I_{C\ sat}$.

WAAROM IN VERZADIGING?

We hebben gezien dat men de transistor bij gebruik als schakelaar in verzadiging stuurt. De spanning over de schakelaar (transistor) is dan minimaal en hij neemt minder dan het toegestane vermogen op.

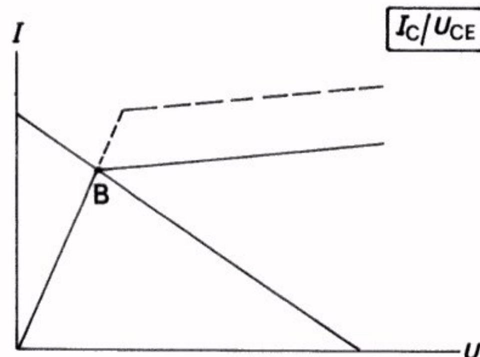
Een andere reden is dat men minder afhankelijk wordt van temperatuursinvloeden en van de spreiding bij transistors.

Bij stijging van de temperatuur schuiven de uitgangskarakteristieken omhoog.
Zou men de transistor *niet* in verzadiging sturen, maar b.v. in punt B_1 instellen, dan komt bij temperatuursverhoging de instelling bij B_2 terecht.



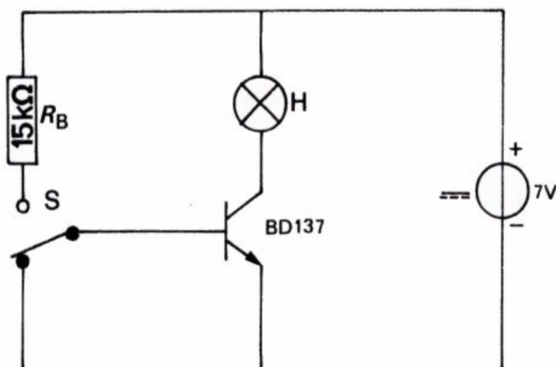
Hetzelfde gebeurt als we een transistor in de schakeling vervangen door een andere met een wat hoger liggende uitgangskarakteristiek.

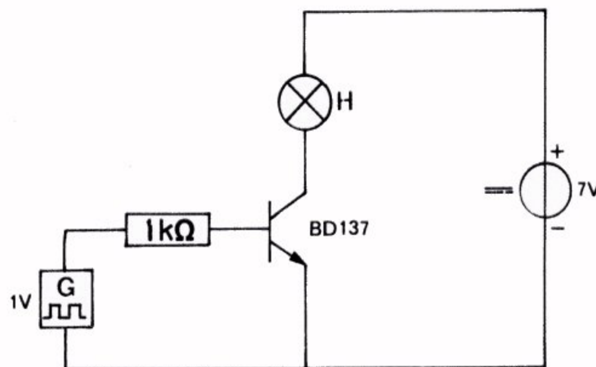
Staat de transistor *wel* bij de kniespanning ingesteld, dan heeft de verschuiving van de karakteristiek naar boven geen andere instelling tot gevolg.



Opmerking: Een transistor die in verzadiging gestuurd wordt heeft meer schakeltijd nodig dan een transistor die niet in verzadiging gestuurd wordt. Men schakelt ook wel zonder de verzadigingstoestand te gebruiken. Het begrip schakeltijd wordt nog uitgebreid besproken in de digitale technieklessen, waaraan deel D van deze cursus gewijd is. We komen daar ook nog terug op het gebruik van de transistor als schakelaar.

OPDRACHT: "SCHAKELEN MET EEN TRANSISTOR"





- Bouw de schakeling die aan de linkerkant getekend is.
- Zet S enige malen om.
  U ziet dat door het al of niet toevoeren van een spanning aan de basis van de transistor in de collectorleiding een lampje wel of niet brandt.
- Bepaal door meting van de spanning over R_B, de stroom die nodig is om de transistor in geleiding te brengen.

  I_B = [ ]

- Verander de schakeling zo als aangegeven op de rechtse tekening.
- Hoe groot is het vermogen ($P = U.I$) dat aan het lampje H geleverd wordt?

  P_H = [ ]

- Hoe groot is de kniespanning U_{CE}, die over de transistor blijft staan?

  U_{CE} = [ ]

- Hoe groot is het vermogen $P_v = U_{CE}.I_C$ dat in de collector van de transistor wordt gedissipeerd?

  P_v = [ ]

- Voer een blokspanning toe met een frequentie van 1 Hz. U ziet dat de blokspanning het lampje nu aan- en uitschakelt. Het schakelen geschiedt nu geheel elektronisch.
- Bepaal opnieuw I_B en het vermogen dat door de blokspanningsgenerator geleverd moet worden.

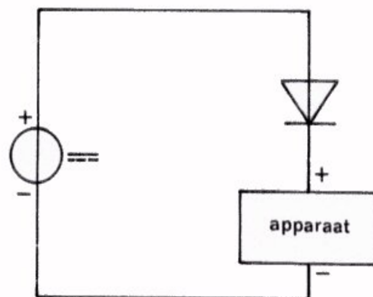
  I_B = [ ]

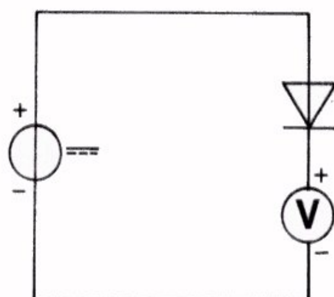
  P_{gen} = [ ]

DE DIODE ALS SCHAKELAAR

Een schakelaar wordt als regel van buitenaf bediend. De starter van een auto bedient men met de hand. Een transistorschakelaar, die tussen collector en emitter schakelt, wordt bediend door aan de basis een signaal toe te voeren.
Deze schakelaars zou men "bestuurde schakelaars" kunnen noemen. Bij een diode is een anode- en een kathode-aansluiting aanwezig. Er is geen derde aansluiting, maar toch is het mogelijk een diode als schakelaar te gebruiken.
De diode wordt als schakelaar bediend door het signaal dat hij al dan niet moet doorlaten. Is U_V voldoende positief dan laat een diode I_V door, maar is U_V te klein of negatief dan laat de diode geen I_V door.
Men zou een diode een "zelfwerkzame schakelaar" kunnen noemen.

VOORBEELD.





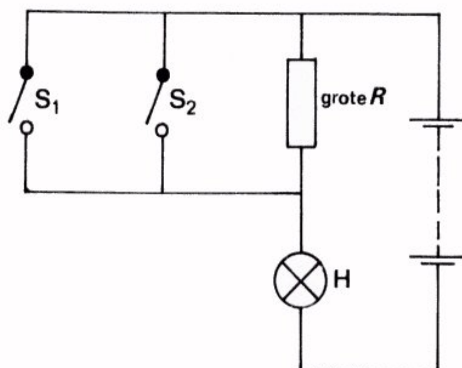
Een apparaat moet op een gelijkspanning worden aangesloten. Het is daarbij van belang dat de + van de gelijkspanning beslist aan de ene kant en de - aan de andere kant van het apparaat komt te liggen.
Door een diode in serie te schakelen met het apparaat kan men het beveiligen tegen verkeerd aansluiten.
De diode heeft hier de functie van een schakelaar; hij blijft "open" als het signaal "verkeerd" is en gaat "dicht" bij een "juist" signaal.

Een dergelijke beveiliging kan worden toegepast bij gelijkspanningsmeters.

VOORBEELDEN UIT DE SCHAKELTECHNIEK

We geven hier een aantal voorbeelden van het gebruik van dioden als schakelaar. We geven daarbij telkens eerst een schakeling met mechanische schakelaars en daarna de elektronische uitvoering. De voorbeelden zijn aan de schakeltechniek ontleend.

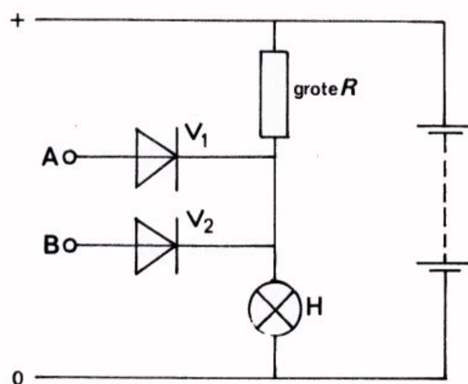
VOORBEELD: "DE OF-SCHAKELING":



Met behulp van deze schakeling kan men een lamp in- of uitschakelen. De eigenschap van deze schakeling is:

Als OF S_1, OF S_2, OF S_1 en S_2 worden gesloten, gaat het lampje branden.

We geven nu een elektronische uitvoering van dezelfde schakeling.



De mechanische schakelaars zijn hier vervangen door dioden. We bedienen deze dioden door de "+ spanning" of door de "spanning 0". Wordt op de ingang A zowel als op de ingang B een "spanning 0" aangesloten, dan zijn beide dioden gesperd. Het lampje brandt dan niet doordat door de grote *R* maar een kleine stroom kan lopen.

Wordt OF aan A, OF aan B, OF aan A en B de "+ spanning" toegevoerd, dan sluit de diode V_1, of de diode V_2, of V_1 en V_2 de weerstand *R* kort. De lamp gaat branden.
De eigenschap van deze schakeling is:

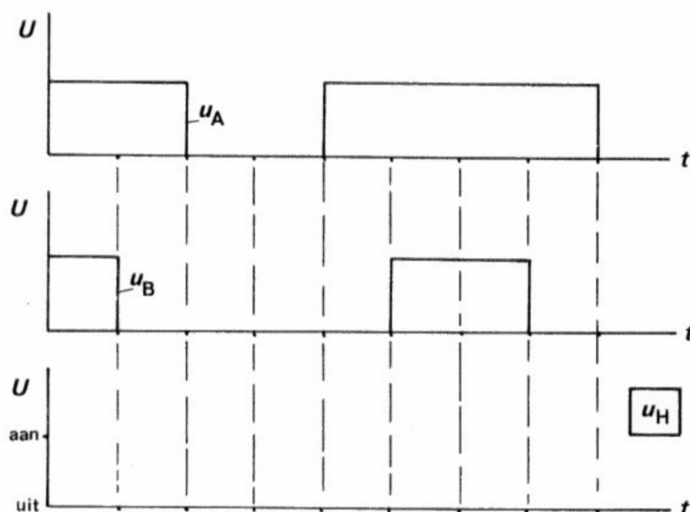
> Als OF op de ingang A, OF op de ingang B, OF op beide ingangen de "+ spanning" wordt aangesloten gaat de lamp branden.

Dit soort schakelingen komt veel voor en dan vaak met nog meer dan twee ingangen. Men noemt zo'n schakeling een: "*OF-schakeling*".

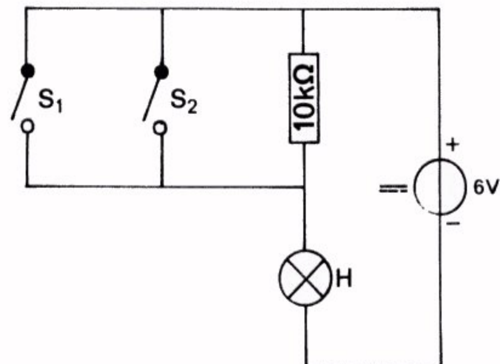
Een praktijkvoorbeeld van een dergelijke schakeling is het volgende.
Een spoorwegovergang moet automatisch beveiligd worden. Als een trein uit de ene richting de overgang tot op 500 m is genaderd moeten de bomen automatisch neergaan. Dit moet ook het geval zijn als er een trein uit de andere richting komt of als er een komt uit beide richtingen. We zorgen er nu voor dat bij nadering van een trein uit de ene zowel als uit de andere richting een "+ spanning" ontstaat. Deze "+ spanning" wordt aan een OF-schakeling toegevoerd die op zijn beurt de slagbomen bedient.
De bomen sluiten zich dus als er OF een trein uit de ene OF een trein uit de andere richting komt, OF als er twee treinen komen, uit elke richting een.
Opmerking: In de hier gegeven diodeschakeling worden de spanningen door middel van snoertjes op de dioden aangesloten. In praktische digitale schakelingen worden blokspanningen op de dioden aangesloten.

OEFENING:

Probeer in volgende spannings-tijddiagrammen eens na te gaan wanneer de lamp H brandt.

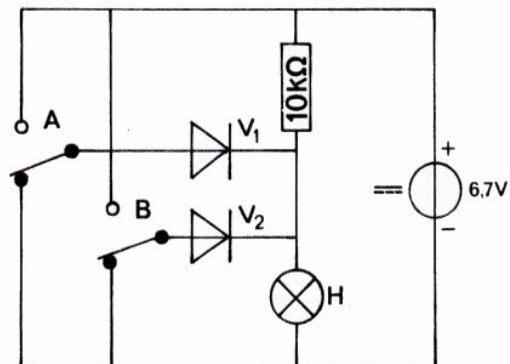


OPDRACHT: "HET SCHAKELEN MET EEN OF-SCHAKELING"



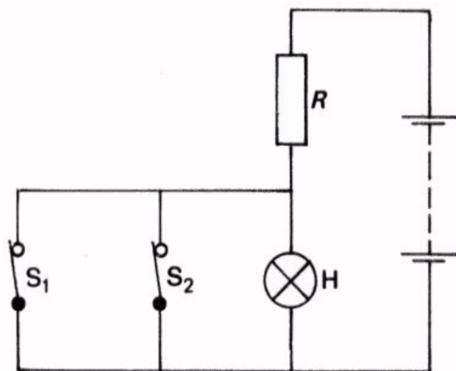
- Bouw deze schakeling.
- Sluit S_1 en let op het lampje.
- Open S_1 en sluit S_2 en let op het lampje.
- Sluit S_1 en S_2 en let op het lampje.

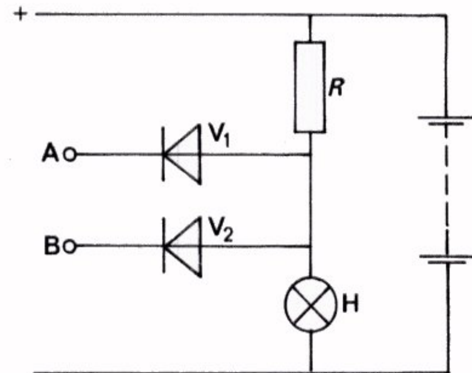
  U constateert nu dat het lampje brandt, als OF S_1, OF S_2, OF S_1 en S_2 gesloten zijn.



- Bouw nu deze schakeling.
- Ga na dat deze ook werkt als een "OF-schakeling".

VOORBEELD VAN EEN "EN-SCHAKELING"





Ook hier op het linker schema ziet u een schakeling waarmee we een lamp kunnen laten branden. De eigenschap van deze schakeling is:

Als EN S_1, EN S_2 worden geopend, gaat de lamp branden.

S_1, zowel als S_2 sluiten immers de lamp kort. Pas als *beide* kortsluitingen worden verbroken gaat de lamp branden.

Het rechter schema geeft een elektronische uitvoering van dezelfde schakeling.

Sluiten we op de ingang A, zowel als op de ingang B een "spanning 0" aan, dan staan beide dioden in de doorlaatrichting. Het lampje brandt niet.
Sluiten we nu op de ingang A een "+ spanning" aan en op ingang B een "spanning 0", dan brandt het lampje nog niet. Immers, de diode V_2 sluit het lampje nog steeds kort.
Pas als op beide uitgangen een "+ spanning" staat gaat het lampje branden.

De eigenschap van de schakeling is dus:

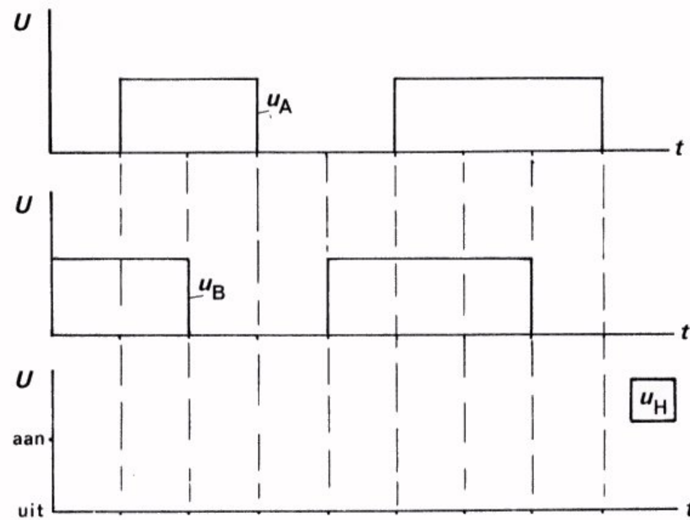
Als EN op ingang A, EN op ingang B een "+ spanning staat", brandt het lampje.

Een dergelijke schakeling komt veel voor en dan vaak nog met meer dan twee ingangen. Men noemt zo'n schakeling een "*EN-schakeling*".

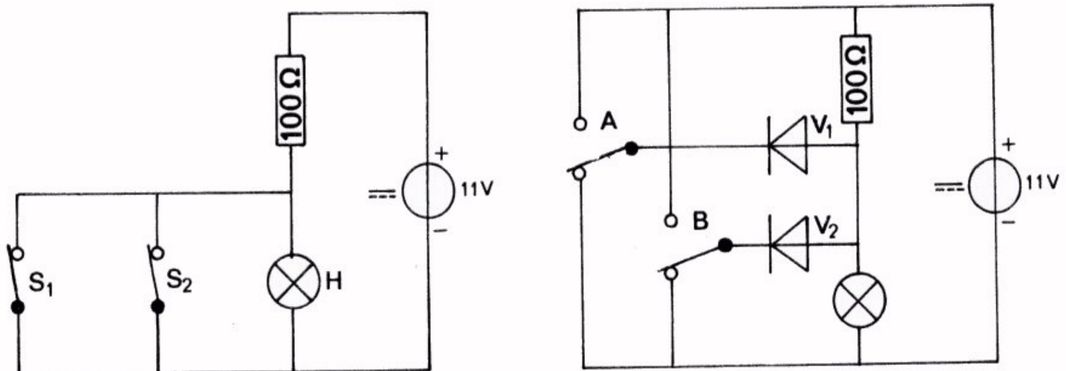
Een praktijkvoorbeeld is het volgende.
Een trein mag pas gaan rijden als alle deuren dicht zijn. Men kan hiervoor volgende automatische beveiliging aanbrengen. Elke deur geeft bij de machinist een "+ spanning". De "+ spanningen" van alle deuren worden aan een EN-schakeling toegevoerd. Deze schakeling maakt daarna de mogelijkheid vrij om de trein weg te laten rijden.

OEFENING:

Probeer ook voor de EN-schakeling het spannings-tijddiagram zo in te vullen dat u kunt zien wanneer de lamp H brandt.



OPDRACHT: HET SCHAKELEN MET EEN EN-SCHAKELING



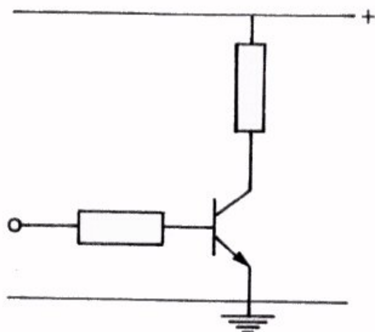
- Bouw de linker schakeling.
- Open S_1 en let op het lampje.
- Sluit S_1 en open S_2 en let op het lampje.
- Open S_1 en S_2 en let op het lampje.

  U kunt nu constateren dat het lampje alleen brandt als EN S_1 EN S_2 worden geopend.

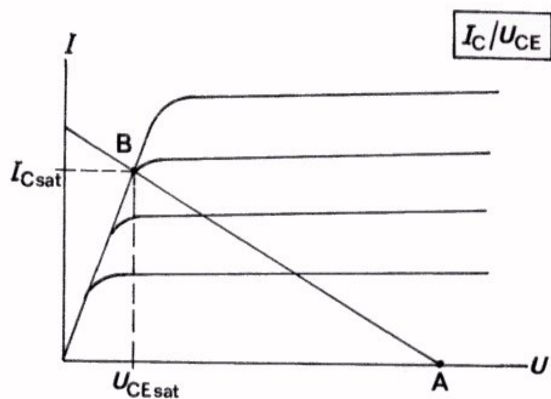
- Bouw nu de rechter schakeling.
- Ga na dat ook deze werkt als een "EN-schakeling".

SAMENVATTING

- Met behulp van dioden en transistors kan men schakelen. De transistor past men dan meestal toe in de GES, soms ook als emittervolger.



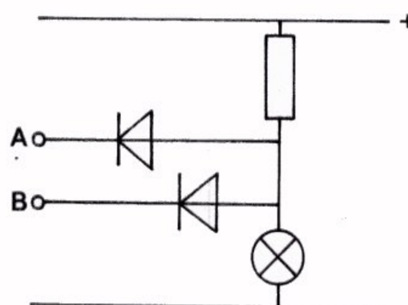
Met een NPN-transistor schakelt men door aan de basis een "+ spanning" of een "spanning 0" toe te voeren;
met een PNP-transistor een "- spanning) of een "spanning 0".



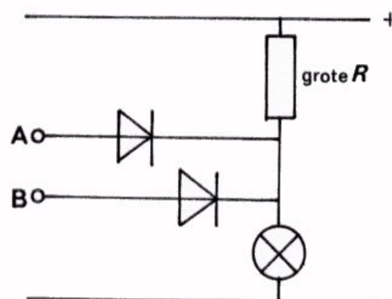
De twee schakelposities worden op de belastinglijn weergegeven door de punten A en B.
De niet geleidende toestand (I_C = 0) wordt bereikt in A.
De geleidende toestand in B.
De kleinste spanning U_{CE}, die optreedt in de bocht of knie van de uitgangskarakteristiek, heet *knie-* of *verzadigingsspanning* $U_{CE\ sat}$

- Ook met een diode kan men schakelen. De diode-schakelaar wordt bediend door het signaal dat hij al dan niet moet doorlaten.

- Veel voorkomende schakeling met behulp van dioden zijn:
  - De EN-schakeling.
    De lamp brandt als er een "+ spanning" aangesloten is EN op A EN op B. Is op een klem geen "+ spanning" aangesloten, dan is er een "spanning 0" op aangesloten.



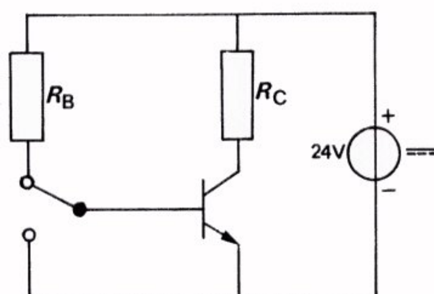
  - De OF-schakeling.
    De lamp brandt als er een "+ spanning" aangesloten is OF op A, OF op B, OF op A en B.



NAAM: [ ] KLAS: [ ]

OEFENINGEN

1. De transistor in volgende schakeling mag niet meer dan 2 A collectorstroom voeren, niet meer dan 24 V hebben tussen collector en emitter en heeft een maximale collectordissipatie van 1 W. De kniespanning $U_{CE\ sat}$ bedraagt 0,3 V.



- Hoe groot is R_C als de transistor met I_C = 2 A in verzadiging gestuurd wordt?

  R_C = [ ]

- Hoe groot is R_B als h_{FE} = 40, en U_{BE} = 1 V nodig is om de transistor in verzadiging te sturen?

  R_B = [ ]

- Hoe groot is het vermogen P_C dat in de collector wordt gedissipeerd als de transistor geleidt?

  P_C = [ ]

- Hoe groot is het vermogen P_b dat aan de belasting (hier voorgesteld door R_C) geleverd wordt.

  P_b = [ ]

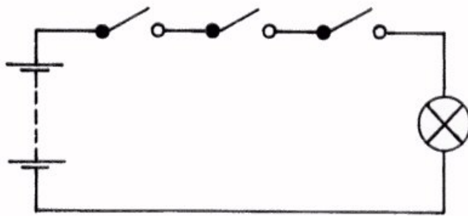
- Is de gebruikte transistor geschikt om dit vermogen in- en uit te schakelen?

  Ja/nee, omdat

  ____

  ____

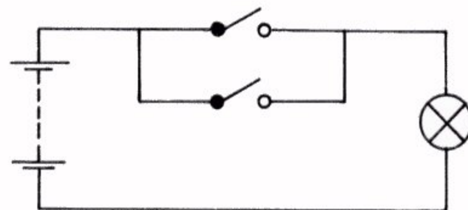
2.



Wat voor soort schakeling is dit?

schakeling

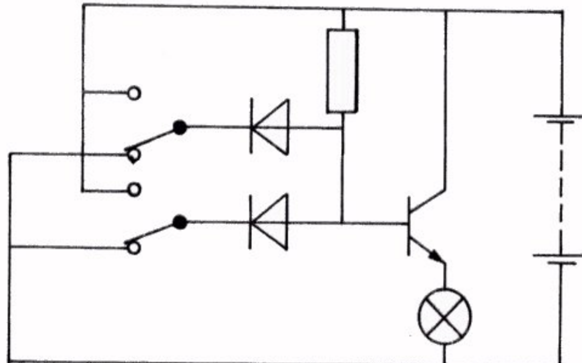
3.



Wat voor soort schakeling is dit?

schakeling

4.



In naaststaand schema wordt een diode-schakeling gebruikt om een als schakelaar dienst doende transistor te bedienen.

In de geschetste ruststand brandt het lampje niet/wel

De diode-schakeling is een ________ schakeling

De transistor is geschakeld als ________

B 219

HERHALING LAGENTRANSISTOR 2

INLEIDING

In deze les herhalen we de leerstof over de lagentransistor. Ook les B214 was een herhalingsles over de transistor. Het is verstandig als u B214 nog eens doorneemt voordat u aan deze les begint.

- Werk daarna deze les grondig door.
- Als u bepaalde dingen nog niet duidelijk zijn, vraag uw leraar dan om nadere uitleg.
- Bestudeer de samenvattingen van de voorafgaande lessen nog eens goed.
- Ga na in welke oefeningen u fouten maakt en probeer te achterhalen waarom u die maakt.
- Gebruik de *geheugensteun*.

In deze herhalingsles bevindt zich ook een meetopdracht. Dit ter voorbereiding van de test waarin ook praktische metingen zijn opgenomen.

DE DRIE PRINCIPE-SCHEMA'S

Met een transistor zijn drie wisselstroomschema's mogelijk. Hieronder zijn deze in hun eenvoudigste vorm weergegeven. De voornaamste eigenschappen zijn erbij vermeld.

GES	GBS	GCS emittervolger
$R_{ing} = h_{ie} = \frac{u_{be}}{i_b} = h_{fe} \cdot \frac{1}{S}$ $R_{uit} \approx R_C$	$R_{ing} = h_{ib} = \frac{u_{eb}}{i_e} \approx \frac{1}{S}$ (klein) $R_{uit} \approx R_C$	$R_{ing} = \frac{u_b}{i_b} \approx h_{fe} \cdot R_E$ (groot) $R_{uit} \approx \frac{1}{S}$ (klein)
$A_u = \frac{u_{ce}}{u_{be}} = S.R_C$ 180^0 faseverandering tussen u_{ce} en u_{be}	$A_u = \frac{u_{cb}}{u_{eb}} = S.R_C$ Géén faseverandering tussen u_{cb} en u_{eb}	$A_u \approx 1$ Géén faseverandering tussen u_e en u_b
$\frac{i_c}{i_b} = h_{fe}$	$\frac{i_c}{i_e} \approx 1$	$\frac{i_e}{i_b} \approx h_{fe}$

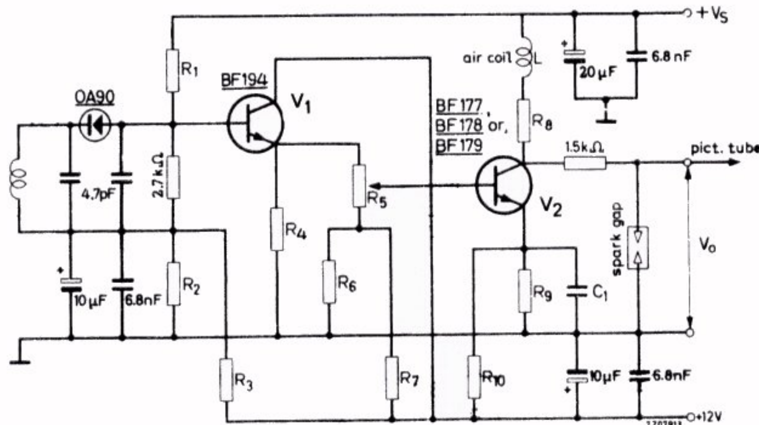
De formules in dit overzicht gelden voor de getekende schema's. Praktijkschema's bevatten meer componenten, waardoor het rekenen eraan iets uitgebreider wordt. Zo moet men bij de GES en de GCS bij R_{ing} nog rekening houden met de basisweerstand(en), die nodig zijn om R_B toe te voeren. Bij de GBS is vaak een extra R_E aanwezig. Deze weerstanden verminderen de grootte van de stroomversterking

$$\frac{i_u}{i_i} = A_i.$$

Verder komt bij de GES en de GBS aan R_C en bij de GCS aan de R_E nog een belasting parallel te staan. Deze belastingen verminderen in schakelingen de grootte van A_u en A_i.

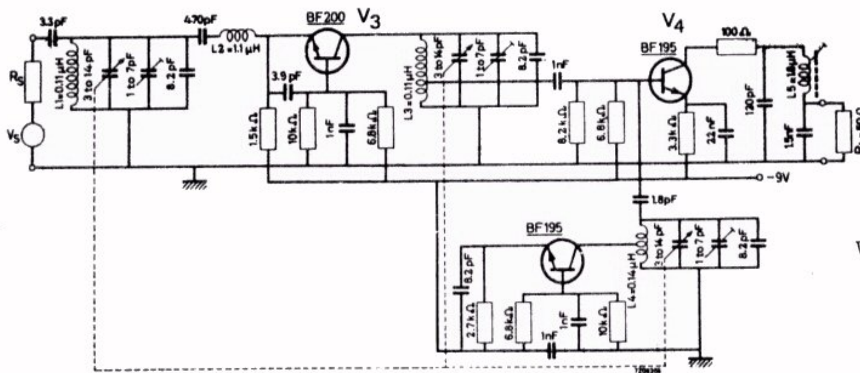
TEST UZELF

Geef voor de in onderstaande schema's aangeduide transistoren aan in welke grondschakeling zij worden toegepast.



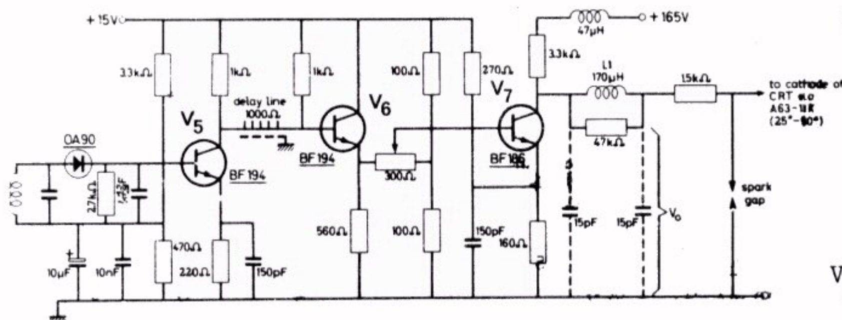
V1 in

V2 in



V3 in

V4 in



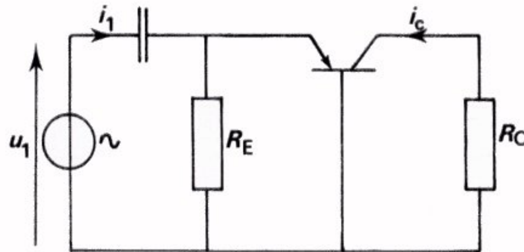
V5 in

V6 in

V7 in

TEST UZELF

1.



$S = 200$ mA/V

$R_E = 20\ \Omega$

Bepaal: $A_i =$ [ ]

de weerstand gezien vanuit de generator: $R_{ing} =$ [ ]

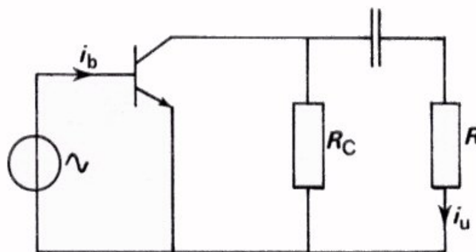
2.

$h_{fe} = 400$

$S = 200$ mA/V

$R_C = 1$ kΩ

$R = 250\ \Omega$.



Bepaal A_i, A_u en A_p van de schakeling:

$A_i =$ [ ]

$A_u =$ [ ]

$A_p =$ [ ]

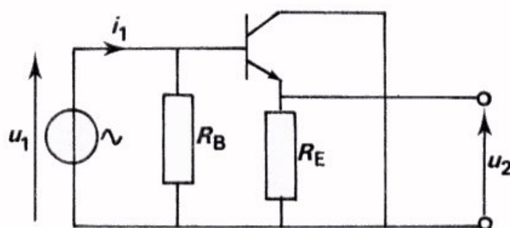
3.

$h_{fe} = 600$

$S = 250$ mA/V

$R_E = 1$ kΩ

$R_B = 400$ kΩ.



Bepaal van deze schakeling R_{ing}, R_{uit}, A_i en A_u.

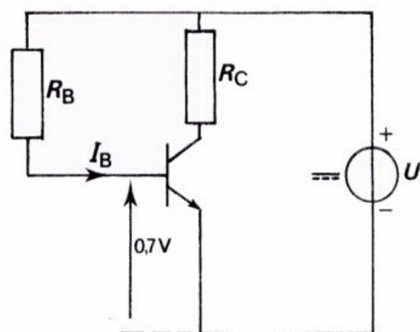
$R_{ing} \approx$ [ ]

$R_{uit} \approx$ [ ]

$A_i = \frac{i_e}{i_1} \approx$ [ ]

$A_u \approx$ [ ]

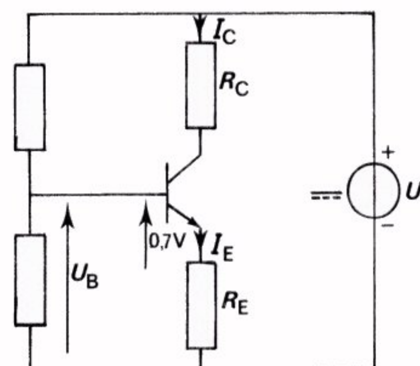
DE GES MET EMITTERWEERSTAND



In deze schakeling geldt:

$$I_B \approx \frac{U - 0,7}{R_B}$$

I_B is vrijwel onafhankelijk van de eigenschappen van de transistor.
De h_{FE}'s van transistors van hetzelfde type kunnen echter sterke spreiding vertonen en dat betekent zeer verschillende I_C's.



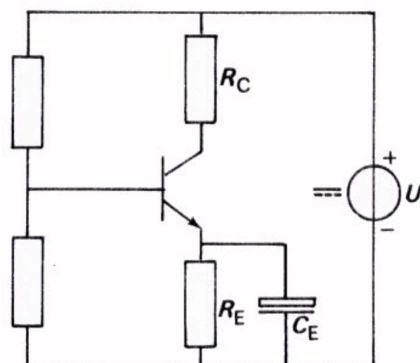
In deze schakeling met emitterweerstand R_E geldt:

$$I_E \approx \frac{U_B - 0,7}{R_E} \approx I_C.$$

I_C is vrijwel onafhankelijk van de eigenschappen van de transistor. Deze schakeling geeft voor transistors met zeer verschillende h_{FE}'s nagenoeg dezelfde I_C.

Door het aanbrengen van R_E kan men I_C nagenoeg onafhankelijk maken van de spreiding. Bij toename van de temperatuur neemt U_{BE} toe en daardoor in principe ook I_C. Door aanbrengen van R_E stabiliseert men de I_C-waarde ook voor de temperatuur. Door aanbrengen van R_E zonder C_E wordt de wisselspanningsversterking kleiner; immers $i_c \approx i_e$ en $i_b \approx U_{RE}$ zodat

$$A_u \approx \frac{R_C}{R_E}.$$

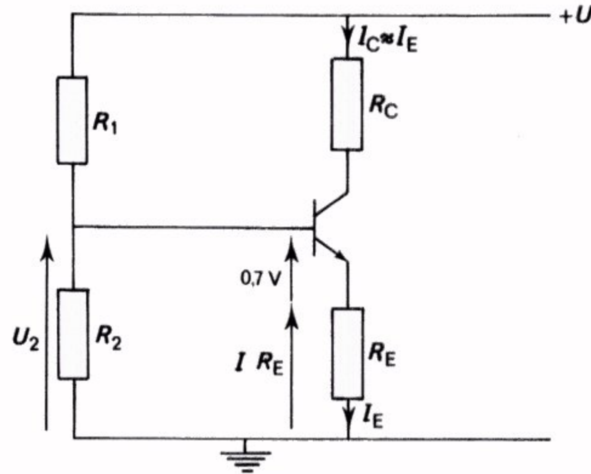


Ga na of u dit goed begrijpt.

Door het aanbrengen van de ontkoppelcondensator C_E is de wisselspanningsversterking weer groot en gelijk aan: $A_u = S \cdot R_C$.

VOORBEELD VAN EEN BEREKENING

We geven hier nog eens een voorbeeld van de globale berekening van de transistor-gelijkstroom I_E voor volgende schakeling.



Bij deze schakeling is gegeven: $U = 20$ V

$R_1 = 9$ kΩ

$R_2 = 1$ kΩ

$R_E = 0{,}2$ kΩ.

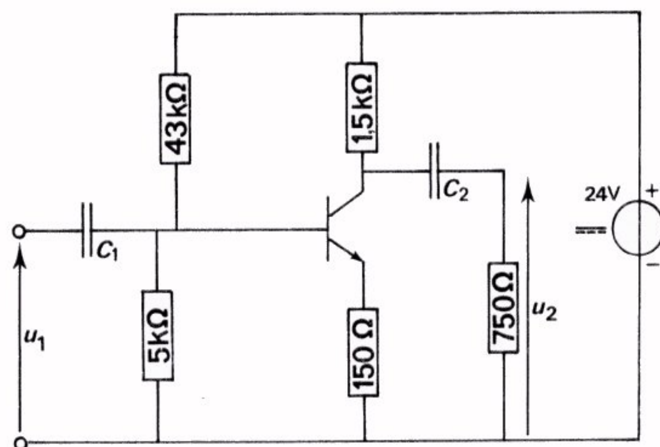
Gevraagd hoe groot de stroom I_E ongeveer zal zijn.

$$U_2 \approx \frac{R_2}{R_1 + R_2} U = \frac{1}{10} \cdot 20 = 2 \text{ V}.$$

$$I_E \approx \frac{U_2 - 0{,}7}{R_E} = \frac{2 - 0{,}7}{200} = \frac{1{,}3}{200} \text{ A} = \underline{6{,}5 \text{ mA}} \approx I_C$$

Is u dit niet geheel duidelijk, vraag dan uw leraar om uitleg.

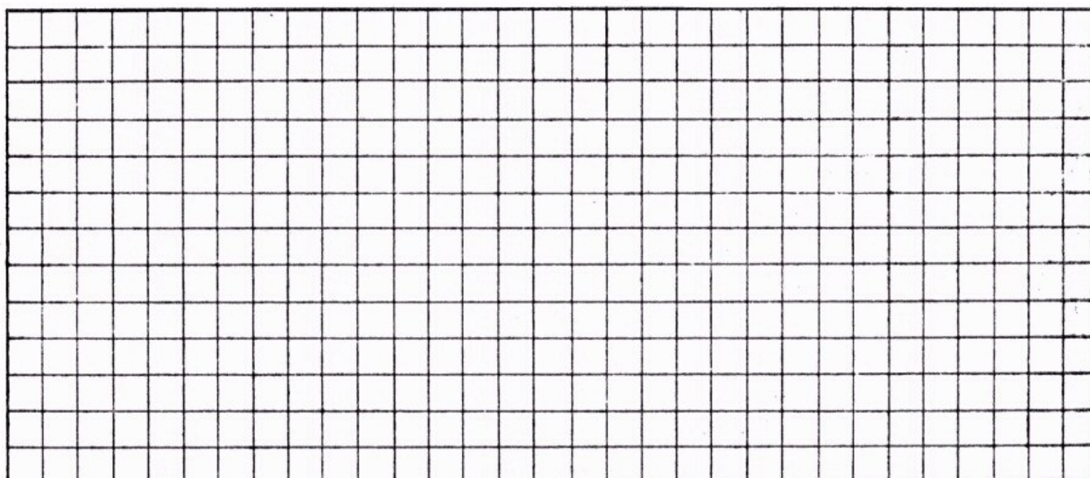
TEST UZELF



h_{fe} = 800.

Neem aan dat de impedanties van de condensatoren te verwaarlozen zijn.

- Teken het gelijk- en het wisselstroomschema.



gelijkstroomschema wisselstroomschema

- Hoe groot is I_E ongeveer?

$I_E \approx$

- Hoe groot is A_u ongeveer?

$A_u \approx$

- Hoe groot is R_{ing} ongeveer?

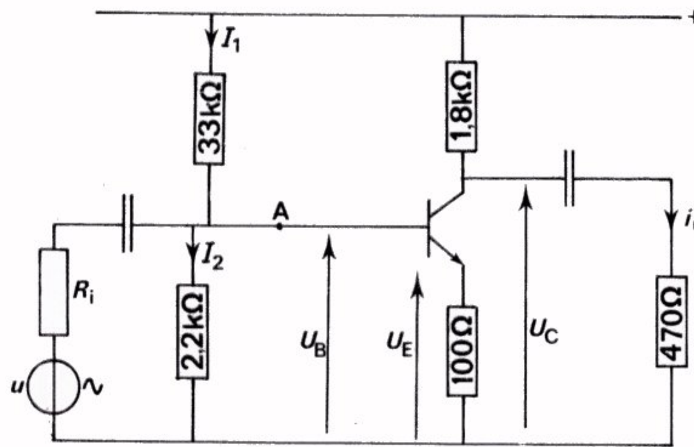
$R_{ing} \approx$

HET METEN VAN STROMEN EN SPANNINGEN IN TRANSISTORSCHAKELINGEN

Om te controleren of een schakeling met transistoren goed functioneert moet men verschillende spanningen en soms ook stromen meten.

- Spanningen meet men meestal t.o.v. aarde of chassis.
- Stromen meet men vaak indirekt door de spanning over een bekende weerstand te bepalen.
  Door zo stromen te meten behoeft men in een schakeling niets los te solderen.

VOORBEELD



In deze schakeling bepaalt men:

U_{CE} door U_C en U_E te meten; $U_{CE} = U_C - U_E$

U_{BE} door U_B en U_E te meten; $U_{BE} = U_B - U_E$

I_E door U_E te meten; $I_E = \frac{U_E}{100}$

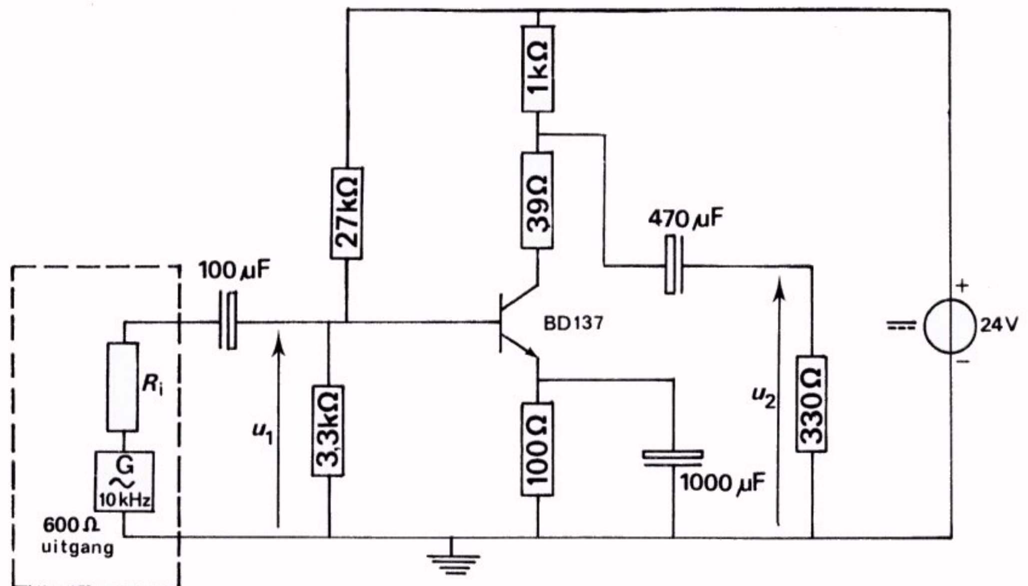
u_{ce} door u_c en u_e te meten; $u_{ce} = u_c - u_e$

i_u door u_c te meten; $i_u = \frac{u_c}{470}$.

OPMERKING:

Om I_B te meten moet men een stroommeter of een weerstand bij A in de leiding opnemen. Het meten van I_1 en I_2 zal meestal te onnauwkeurig zijn.

OPDRACHT: METEN VAN STROMEN EN SPANNINGEN IN EEN TRANSISTORSCHAKELING



- Bouw deze schakeling *overzichtelijk* op het paneel.
- Meet volgende spanningen en stromen.

U_{BE} =		U_{CE} =	
I_C =		I_B =	

- Bepaal A_u =
- Stel $U_{1(eff)}$ in op 10 mV en meet: i_c =
- Hoe groot is de steilheid S van deze transistor

S = mA/V

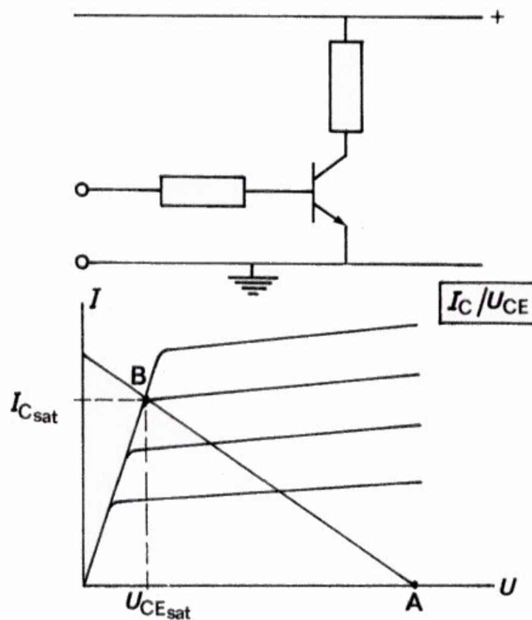
SCHAKELEN MET HALFGELEIDERS.

Met behulp van halfgeleiders kan men schakelen. Het kan met een *diode.*

De diode vormt vrijwel een kortsluiting of niet, afhankelijk van het signaal dat wordt toegevoerd.

Het kan ook met een *transistor* bijvoorbeeld in GES.

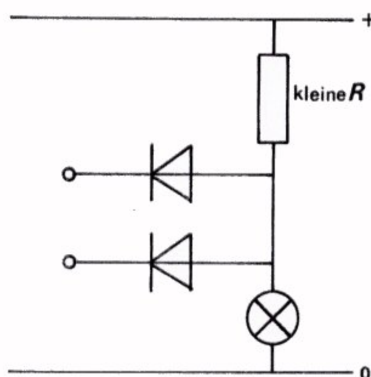
Deze reageert op een signaal dat aan de basis wordt toegevoerd. Afhankelijk van dit signaal bestaat er tussen collector en emitter vrijwel een kortsluiting of niet.



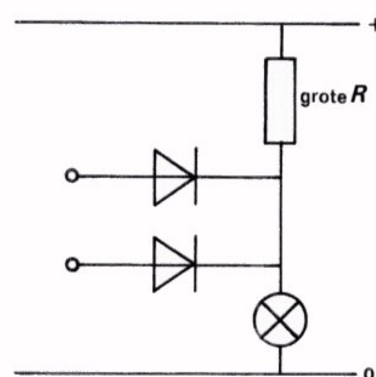
Voert men aan de basis géén stroom toe, dan is de transistor in A ingesteld. Voert men aan de basis voldoende stroom toe, dan is de transistor *in verzadiging* in B ingesteld en voert hij bij de gegeven belasting maximale stroom.

Veel voorkomende schakelingen met dioden zijn de:

EN-schakeling

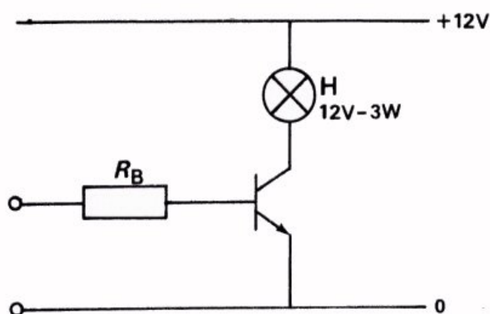


OF-schakeling



TEST UZELF

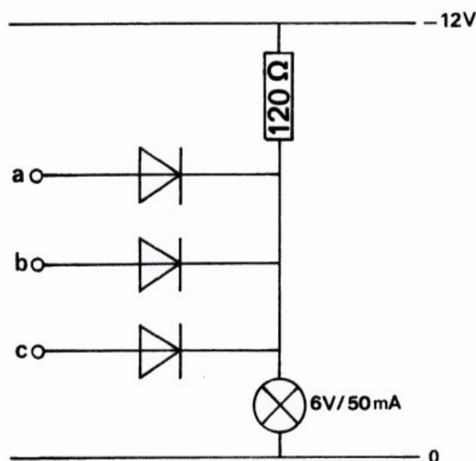
1\.



Met nevenstaande Si-transistor moet men een lamp van 12 V - 3 W in en uit kunnen schakelen. Men voert daartoe aan de ingang een spanning van 12 V of 0 V toe. h_{FE} = 125. Men mag U_{CE} en U_{BE} in de stroomvoerende toestand gelijk aan 0 stellen. Kies R_B uit de E-12 reeks zodanig dat de transistor juist in verzadiging gestuurd wordt.

R_B = [kΩ]

2\.



Aan de ingang a, resp. b, resp. c, voert men een spanning 0 of een negatieve spanning van -12 V toe. In de begintoestand is de spanning aan alle ingangen dezelfde en brandt de lamp niet. Wat voor spanning voert men dan aan de ingangen toe?

Een [ ]

Wat moet men toevoeren om de lamp te doen branden?

[ ]

Is dit een EN- of een OF-schakeling?

Een [- schakeling.]

G E H E U G E N S T E U N

Siliciumhalfgeleiderdiode:

$I_v = 1$ mA als $U_v \approx 0,6$ V.

Temperatuurafhankelijkheid van U circa 3 mV/^{0}C.

Germaniumhalfgeleiderdiode:

$I_v = 1$ mA als $U_v \approx 0,2$ V.

Temperatuurafhankelijkheid van U_v circa 1 mV/^{0}C.

Transistorschakelingen.

	GES	GBS	GCS
R_{ing}	$h_{ie} = \frac{1}{S} \cdot h_{fe}$	$h_{ib} \approx \frac{1}{S}$	$h_{fe} \cdot R_E$
R_{uit}	R_C	R_C	$\approx \frac{1}{S}$
stroom-versterking	$A_i \approx h_{fe}$	$A_i \approx 1$	$A_i \approx h_{fe}$
spannings-versterking	$S \cdot R_C$	$\frac{R_C}{h_{ib}} \approx SR_C$	$\frac{SR_E}{1 + SR_E} \approx 1$

De versterkingsfactoren in bovenstaande tabel gelden alleen als de instel-weerstand en/of belastingsweerstanden buiten beschouwing blijven.



